



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sami Saariniemi

JULKISIVUAUKON KANTAVAT RAKENTEET

Tekniikka
2020

ABSTRACT

Author	Sami Saariniemi
Title	Load-bearing Structures of the Facade Opening
Year	2020
Language	Finnish
Pages	42 + 7 Appendices
Name of Supervisor	Minna Uimonen

The aim of the thesis was to find out the best possible way to build large load-bearing structures for facade openings in detached houses. The work is limited to steel, wood and concrete structures. The thesis does not deal with the structures of traditional small facade openings such as doors and windows. The thesis was commissioned by LPJ-Rakennus Oy. The purpose was to find out the alternatives for the solution of the load-bearing structures of the facade openings for the client. The solution was intended to be cost-effective and easy-to-build and suitable for various applications.

LPJ-Rakennus Oy's terraced house projects were used as an example in the thesis. In the thesis, the strength calculations of the load-bearing structures of the glass opening for the example object were made, the moisture behavior was examined, and the costs of the structure were calculated. The strength calculations were performed on steel, wood and concrete structures using the SCIA program. For example, the deflection, utilization, torsion and buckling of the structure were considered in the calculations. Moisture transfer in the structures was examined using the DOF thermal program. RT and Ratu card files, SFS standards and various online publications and articles were used as sources in the sample work.

Based on the calculations made in the thesis, it can be stated that by combining steel and concrete, the best load-bearing structure is obtained. In terms of moisture technology, all three materials work. The results show which materials are suitable for different types of objects.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	8
2	JULKISIVUAUKOT JA NIIDEN RAKENTEET	9
	2.1 Julkisivu ja ulkoseinä	9
	2.2 Yleiset suunnitteluperiaatteet	9
	2.3 Kantavat rakennusmateriaalit	10
3	RAKENNUSMATERIAALIT	13
	3.1 Teräs	13
	3.1.1 Yleistä	13
	3.1.2 Vahvuudet ja heikkoudet	13
	3.2 Puu 14	
	3.2.1 Yleistä	14
	3.2.2 Vahvuudet ja heikkoudet	15
	3.3 Betonirakenteet	15
	3.3.1 Yleistä	15
	3.3.2 Vahvuudet ja heikkoudet	16
4	ESIMERKKIKOHTTEEN LASKELMAT	18
	4.1 Lujuuslaskelmat	18
	4.1.1 Teräsrakenne	19
	4.1.2 Puurakenne	27
	4.1.3 Betonirakenne	33
	4.1.4 Yhteenveto	35
	4.2 Kosteuslaskelmat	36
	4.3 Kustannuslaskelmat	38
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	40
	LÄHTEET	41

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Seuraamusluokkien määrittely rakennuksille ja rakenteille. /16, s.23/ . 11	
Kuva 2. Kehärakenteen mitat ja tukirakenteet. 19	19
Kuva 3. Teräsrakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkaus IPE330 ja CFRHS 140x80x6 profiileista. 20	20
Kuva 4. Teräspalkin maksimitaipuma. 25	25
Kuva 5. Puurakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkauksien mitat. 27	27
Kuva 6. Liimapuu GL30c palkin materiaaliominaisuudet. 28	28
Kuva 7. Puupalkin maksimitaipuma. 31	31
Kuva 8. Poikkileikkausvakioiden ratkaisukaavat. 31	31
Kuva 9. Liimapuu GL30c pilarin materiaaliominaisuudet. 33	33
Kuva 10. Betonirakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkauksien mitat. 34	34
Kuva 11. Betonipalkin maksimitaipuma. 35	35
Kuva 12. Esimerkkirakenne DOF-lämpö ohjelman tuloksesta. Kun lämpökäyrä punainen viiva ja kosteuskäyrä sininen viiva eivät kohtaa, kastepistettä ei synny. 36	36
Kuva 13. Betonirunkorakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet. 37	37
Kuva 14. Puurunko rakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet. 38	38
Kuva 15. Teräsrunkorakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet. 38	38
Taulukko 1. Poikkileikkausluokkien $M_{c,Rd}$ ratkaisukaavat. 20	20
Taulukko 2. Tekijöiden C1, C2 ja C3 arvot momenttipintojen ja tehollisen pituuden k kertoimen avulla. 23	23
Taulukko 3. Tehollisen pituuden kertoimet eri tuentatapauksille. 24	24
Taulukko 4. Kiepahduskäyrien suositeltavat epätarkkuustekijät. 24	24
Taulukko 5. Materiaalien kustannukset eriteltyinä. 39	39

LIITELUETTELO

LIITE 1. Lämpötila- ja kosteyslaskelmat, puu

LIITE 2. Lämpötila- ja kosteyslaskelmat, teräs

LIITE 3. Lämpötila- ja kosteyslaskelmat, betoni

LIITE 4. Kustannuslaskelma, betoni

LIITE 5. Kustannuslaskelma, puu

LIITE 6. Kustannuslaskelma, teräs

LIITE 7. Kustannuslaskelma, betoni ja teräs

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää paras mahdollinen tapa rakentaa pientalojen suuria julkisivuaukkojen kantavia rakenteita. Työssä ei käsitellä perinteisten pienten julkisivuaukkojen kuten ovien ja ikkunoiden rakenteita. Työ on rajattu koskemaan yleisimpiä rakennusmateriaaleja. Nämä ovat teräs, puu ja betoni.

Toimeksiantajana toimii LPJ-Rakennus Oy, joka on perustettu Raumalla vuonna 1994 ja on erikoistunut korjausrakentamiseen ja linjasaneeraukseen. Yrityksen asiakkaina ovat taloyhtiöt, muut Rauman lähialueen yritykset sekä kaupungit ja kunnat. LPJ-Rakennus työllistää noin 11 työntekijää. LPJ-Rakennus on pk-yritys ja sen liikevaihto on noin 1,6 miljoonaa euroa. /13/

Toimeksiantajan tarkoituksena on saada työn avulla selvitettyä vaihtoehdot julkisivuaukkojen kantavien rakenteiden ratkaisumahdollisuuksista. Työn aihe on ajankohtainen, koska toimeksiantajalla ei ole riittävästi tietoa suurista julkisivuaukoista tulossa olevaa kohdetta varten. Työn esimerkkikohteena on LPJ-Rakennus Oy:n rivitalohanke, joka on uudisrakennushanke. Kohteeseen tulee suuri julkisivuaukko, jonka verhous tehdään lasista. Opinnäytetyössä tehdään esimerkkikohteen lasiaukon kantavien rakenteiden lujuuslaskelmat, tarkastellaan kosteuskäyttäytymistä ja lasketaan rakenteen kustannukset. Lujuuslaskelmat tehdään teräs-, puu- ja betonirakenteille SCIA-ohjelmalla. Kosteuden siirtymistä rakenteissa tarkastellaan DOF-lämpöohjelman avulla. Kustannuslaskelmissa käytetään Rakennustieto RT-kustannuslaskentaohjelmaa. Opinnäytetyötä on tarkoitus hyödyntää myös muissa toimeksiantajan vastaavissa rakennushankkeissa.

Opinnäytetyön laskelmissa käytetään Eurokoodeja ja Suomen rakentamismääräyskokoelmaa. Eurokoodeilla on tärkeä osuus työn lujuuslaskelmissa, jotta rakennusmateriaalien kestävyys voidaan laskea. Työssä käytetään aineistona myös aiheeseen liittyvää kirjallisuutta ja eri verkkosivuja.

2 JULKISIVUAUKOT JA NIIDEN RAKENTEET

2.1 Julkisivu ja ulkoseinä

Julkisivuksi kutsutaan rakennuksen ulospäin näkyvintä osaa ja se on osa ulkoseinää. Ulkoseinää voidaan kutsua myös rakennuksen vaipaksi. Vaippa on yleensä tehty vaaka- ja pystyprofiileista koostuvasta rungosta. Profiilit on liitetty toisiinsa ja kiinnitetty rakennuksen kantavaan runkoon. Julkisivussa on kiinteitä ja avattavia verhouksia kuten ovia ja ikkunoita. /1, s. 87/

Julkisivun tulee kestää eri kosteuden lähteitä. Näitä ovat vesi- ja lumisade, sisä- ja ulkoilman kosteus, maaperän kosteus, pintavesi, rakennuskosteus, tilojen käytöstä aiheutuvat kosteusrasitteet ja mahdolliset vuoto- ja roiskevedet. Vuodenaika ja sään vaihtelu vaikuttavat hyvin suuresti kosteuden määrään ja lähteisiin. /2, s. 120–123/

2.2 Yleiset suunnitteluperiaatteet

Julkisivujen suunnittelussa tulee ottaa huomioon tekijöitä, jotka vaikuttavat rakenteen toimivuuteen, turvallisuuteen ja rakennuksen ulkonäköön. Julkisivun rakenneratkaisuissa tulee ottaa huomioon kantava rakenne ja kuormitukset, ulkonäölliset tavoitteet kuten verhouksen materiaalit ja värit, lämmöneristysvaatimukset sekä palo- ja äänitekniset vaatimukset. Myös sisäilman lämpötila, painesuhteet, viistosaderasitus ja muut kosteusrasitukset, käyttöikä ja varmuustavoitteet täytyy huomioida. /2, s. 120–123/

Rakenteen täytyy toimia lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin. Lämpö- ja kosteusteknisessä suunnittelussa tulee ottaa huomioon ulkoseinän lämpö- ja kosteustekninen perusratkaisu, julkisivun verhouksmateriaali ja materiaalin kiinnitys. Myös lämmöneristys, ilmatiiveys, höyrinsulku, ulkoverhouksen mahdollinen tuuletus, liitokset muihin rakenteisiin, liikuntasaumamat ja lävistyksset on otettava huomioon. /2, s. 120–123/

Julkisivussa voi olla aukkorakenteita, jotka on verhoiltu lasiseinällä. Lasiseinän julkisivumateriaalina käytetään yleisimmin profiililaseja. Profiililaseja on saata-

villa sekä ulkonäöltään että muodoltaan montaa eri tyyppiä. Profiililasien pituus voi enintään olla 7,0 m. Asennustapa ja -kohde määräävät lasin lopullisen pituuden. Profiililaseja saa myös useina leveyksinä. /3/

2.3 Kantavat rakennusmateriaalit

Kantavien rakenteiden tärkein tehtävä on vastaanottaa kuormaa kuten puristusta ja vetoa. Kantavat rakenteet siirtävät kuorman rakennuksen perustuksiin, josta kuorma siirtyy kantavaan maapohjaan. Kuorma muodostuu rakennuksen omasta kuormasta ja käytöstä aiheutuvista kuormista. Käytöstä aiheutuvia kuormia ovat hyötykuormat ja luonnonolosuhteista johtuvat kuormat kuten lumi- ja tuulikuormat sekä lämpötilaeroista johtuvat kuormat. Kantavien rakenteiden pitää kestää murtotilakapasiteetin kaikki vaikutukset, pysyä käyttökelpoisena ja olla onnettomuustilanteissa riittävän kestävä. Kantavien rakenteiden suunnittelussa huomioidaan niiden seuraamusluokka, käyttöikävaatimukset ja rasitusluokka. Rakenteiden suunnittelussa pitää noudattaa standardissa SFS-EN 1990 esitettyjä suoritusarvoja ja liitteitä, jos maan kansallisessa liitteessä ei toisin esitetä. /16, s .6/

Seuraamusluokkaan vaikuttavat rakennuksen koko ja käyttötarkoitus, rakennuspaikka ja sen lähiympäristö, rakenteiden mittasuhteet ja ominaispiirteet. Seuraamusten vakavuus ja suunnittelutehtävän vaativuus tulee arvioida tapauskohtaisesti. Seuraamusluokkia on kolme CC3, CC2 ja CC1, jotka esitetään kuvassa 1. Seuraamusluokka vaikuttaa osavarmuuskertoimiin. /16, s. 7–9/

Seuraamusluokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko ¹⁾ jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten - yli 8-kerroksiset ²⁾ asuin-, konttori- ja liikerakennukset - konserttitalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esimerkiksi korkeat tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä erityisesti hienorakeisten maalajien alueilla.
CC2	Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristö-vahinkojen takia	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.
CC1	Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkitysettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset ²⁾ rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä ³⁾ kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m ² tai suurin jänneväli enintään 6 metriä. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa kuten - matalalla olevat terassit ja alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.

¹⁾ pienehköt rakennusrungosta erilliset välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi kokonaisuutena jäykistävänä rakenteena.

²⁾ kellarikerrokset mukaan luettuina.

³⁾ tilapäisenä oleskeluna pidetään päivittäistä käymistä rakennuksessa, mutta ei siellä pidempään viipymistä.

Kuva 1. Seuraamusluokkien määrittely rakennuksille ja rakenteille /16, s.23/.

Rakennuksen suunniteltu käyttöikä on yleensä vähintään 50 vuotta. Merkittävien arvorakennusten suunniteltu käyttöikä on vähintään 100 vuotta. Rakenteet ja niiden osat, jotka katsotaan tilapäisiksi, suunnitellaan vähintään 50 vuoden käyttöiälle. Vaikeasti uusittavat rakenneosat, kuten perustukset, on järkevää suunnitella muuta rakennetta pidemmälle käyttöajalle. Jos rakennukselle tehdään korjaus- ja muutostöitä, määräytyy jäljelle jäävien rakenteiden käyttöikä niille suoritettun kuntutkimuksen perusteella. Kuormien ominaisarvot on normaalisti määritelty 50 vuoden toistumisaikaa vastaavina arvoina. /16, s. 12/

Käytettävien rakennusmateriaalien tulee olla CE-merkittyjä niiden kelpoisuuden ja ominaisuuksien arvioimiseksi. CE-merkinnästä käy ilmi suoritustasoilmoitus, tyyppihyväksyntä, varmennustodistus tai valmistuksen laadunvalvonta. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava siitä, että rakenteille ja rakennustuotteille asetetut vaatimukset täyttyvät ja ne on todettu. /16, s. 14–15/

3 RAKENNUSMATERIAALIT

3.1 Teräs

3.1.1 Yleistä

Teräs on seos rautaa ja hiiltä, jossa hiiltä on alle 1,7 %. Hiilipitoisuudella on suuri vaikutus teräksen ominaisuuksiin. Kantavissa rakenteissa käytettävää terästä kutsutaan rakenneteräkseksi tai hiiliteräkseksi. Teräksen pääraaka-aine on rautamalmin, mutta nykyään käytetään myös paljon kierrätysterästä, jota voidaan käyttää valmistuksessa 20 – 40 % prosessin mukaan. /4, s. 27/

Teräs on yksi eniten käytetyimmistä rakennusmateriaaleista ja tärkein käyttömetalli. Teräsrakentaminen on yleistynyt Suomessa viime vuosikymmenten aikana. Pientalojen teräsrakentaminen on vielä pientä verrattuna toimisto-, liiketila- ja teollisuusrakentamiseen. Yhdysvalloissa sekä Australiassa pientalojen teräsrakentaminen on yleistä. /4, s. 27/

Teräksestä pystytään jalostamaan eri teräslajeja ja niitä on jo useita tuhansia. Teräksen mekaanisia ominaisuuksia on mahdollista muuttaa käyttötarpeiden mukaan säätämällä teräksen koostumusta valmistusprosessin aikana. Teräksen lujuuteen vaikuttaa paljon teräksen hiilipitoisuus. Hiilipitoisuuden perusteella voidaan luokitella eri teräslajit. /4, s. 27/

3.1.2 Vahvuudet ja heikkoudet

Teräs on materiaaliominaisuuksiltaan hyvin kestävä ja teräksen suuri lujuus poikkeaa paljon muista rakennusmateriaaleista. Teräksen lujuus-painosuhte on hyvä. Suuren lujuuden ansiosta teräksestä saadaan tehtyä hoikkia ja kestäviä rakenteita. Teräksen kiinnittäminen ja liitosten tekeminen esimerkiksi hitsaamalla on yleensä yksinkertaista. Terästä käytettäessä on mahdollista tehdä myös suuria muutoksia vielä rakennusvaiheen jälkeen. Teräksellä on pitkä käyttöikä verrattuna esimerkiksi puuhun. Teräs on palamaton materiaali ja korrosio etenee yleensä hitaasti. Teräksellä on hyvä kulutuskestävyys ja siihen ei vaikuta kosteuden tai sääolosuhteiden vaihtelu. /4, s. 28–41/

Teräs on muihin rakennemateriaaleihin nähden kallis. Suurin osa rakenneteräksen kustannuksista syntyy materiaalin ja jalostuksen hinnasta. Teräksen tekoprosessi on pitkä ja se vaatii tarkkuutta seossuhteissa ja rikastamisessa. Teräksen valmistus kuormittaa ympäristöä korkeiden valmistuslämpötilojen ja materiaalien louhinnan takia. /4, s. 28–41/

Vaikka teräksen korkea lujuus mahdollistaa hoikkia ja kestäviä rakenteita, voivat hoikat rakenteet aiheuttaa stabiilisuusongelmia. Suuret lämpötilan vaihtelut vaikuttavat teräksen lujuuteen. Korkeissa lämpötiloissa, esimerkiksi tulipalotilanteessa, teräs pehmenee jopa puuta enemmän. Liian kylmässä lämpötilassa teräs voi haurastua. Lämpötilaongelmat ovat ratkaistavissa palosuojauksilla ja oikealla iskutheydellä. /4, s. 28–41/

Vaikka teräksen korroosio etenee hitaasti, voi se silti tuottaa ongelmia. Varsinkin kosteassa ympäristössä teräksen pinta voi ruostua ja olla esteettisesti huonon näköinen. Korroosio voi kuitenkin edetä syvemmälle teräkseen aiheuttaen teräksen rappeutumista. Korroosiolta on mahdollista suojautua esimerkiksi maalauksella tai lakkauksella. /4, s. 28–41/

3.2 Puu

3.2.1 Yleistä

Puu on Suomessa eniten käytetty rakennusmateriaali. Puun käyttömahdollisuuksia on paljon. Puu on vanhin rakennusmateriaali, jota käytetään edelleen. Puurakentaminen on yksin Suomen perinteisimpiä rakennustapoja. 1700-luvulle saakka puu oli ainoa rakennusmateriaali, joka saattoi vastaanottaa puristus- ja vetovoimia. /5/

Puu on luonnossa itsestään uusiutuva materiaali, joten saatavuus on todella hyvä. Suomessa puuta on käytetty runkomateriaalina 40 – 45 % rakennuksista. Suurin osa Suomen pinta-alasta on metsää. Suomessa kasvaa monia puulajeja, joilla jokaisella on omat ominaisuutensa. /5/

3.2.2 Vahvuudet ja heikkoudet

Puu on helposti työstettävä materiaali ja puu on lujaa suhteessa sen painoon. Puuta voidaan käyttää melkein koko rakennuksen rakentamiseen sen työstettävyyden ja ominaisuuksien perusteella. Puusta saadaan rakennukseen esimerkiksi kantava runko, julkisivut, sisäverhoilut ja jopa lämmöneristys. /5/

Puu pystytään kierrättämään ja puutuotteet voidaan käytöstä poiston jälkeen uusiokäyttää usein sellaisenaan. Myös käytöstä poistettu puu voidaan jatkojalostaa toiseen tarkoitukseen ja muotoon. Jos puuta ei pystytä uusiokäyttämään, se voidaan polttaa ja siihen sitoutunut energia saadaan uudelleen käyttöön. Lisäksi puurakentamisen rakennusjätteet ovat todella vähäisiä. Oikein toteutettuna ja ylläpidettyinä puurakenteet ovat pitkäikäisiä. /5/

Puun mekaanisesta jalostuksesta ja käytöstä aiheutuu hyvin vähän päästöjä verrattuna muihin rakennusmateriaaleihin. Puu sitoo hiilidioksidia itseensä ja toimii hiilidioksidin säiliönä. Koska puolet puusta on hiiltä, niin yksi tonni puuta sitoo jopa kaksi tonnia hiilidioksidia, joten puurakentamisella voidaan ehkäistä ilmaston lämpenemistä. Puu pystyy myös vastaanottamaan ja luovuttamaan kosteutta. /5/

Vaikka puulla on paljon hyödyllisiä ominaisuuksia, on se myös arka rakennusmateriaali. Koska puu sisältää paljon hiiltä, se palaa helposti. Jos puuta ei ole suojattu kosteudelta tai puu altistuu kosteudelle liian pitkään, se lahoaa ja menettää lujuutensa. Vaikka puu on luja materiaali, se on kuitenkin lujuudeltaan paljon heikompi kuin esimerkiksi teräs. Puusta ei saada tehtyä pitkillä jänneväleillä niin hoikkia kantavia rakenteita kuin mitä teräksellä saadaan tehtyä. Puun mekaaninen kulutuskestävyys on huonompi kuin muilla rakennusmateriaaleilla. /5/

3.3 Betonirakenteet

3.3.1 Yleistä

Betoni on yksi eniten käytetyimmistä rakennusmateriaaleista ja sitä käytetään vuosittain noin 13 miljardia kuutiometriä, josta Suomen osuus on noin 5 miljoonaa kuutiometriä. Suomessa betonia käytetään talonrakentamisessa ja infraraken-

tamisessa. Talorakennuksessa betonia käytetään runkorakenteissa ja julkisivuissa. /6/

Betoni on keinotekoisista kiveä, jonka valmistukseen käytetään sementtiä, vettä ja runkoainetta. Sementin ja veden seos sitoo rakenteet yhteen. Sementti ja vesi reagoivat keskenään, jolloin syntyy luja mineraali, joka sitoo runkoainekset yhdeksi lujaksi rakenteeksi. /6/

Sementin raaka-aineina käytetään luonnonmineraaleja kuten kalkkikiveä. Kalkkikivi on maankuoren yleisin kivilaji. Runkoaineena käytetään kiviainesta, joka saadaan suoraan luonnon soraesiintymistä tai kiviaines murskataan kalliosta. Kevytsoran käyttö runkoaineena on vähäistä, mutta sitä käytetään betoniharkoissa. /6/

3.3.2 Vahvuudet ja heikkoudet

Betoni on rakennuksen runkomateriaalina edullinen. Betoni on hyvä materiaali kohteisiin, joissa on suuria kosteusmääriä. Betonilla on suuri puristuslujuus, joka on yleensä 30 – 80 MPa. Betonia on saatavilla korkealujuisena, jonka lujuus on 60 – 100 MP ja erikoislujana, jonka lujuus on 150 – 250 MPa. Betonin lujuus valitaan sen käyttötarkoituksen mukaan. Puristuslujuuteen vaikuttaa erityisesti vesi-sementtisuhde. /9/

Betoni vaimentaa törmäyksien ja räjähdysten aiheuttamia iskuja ja se on itsessään palamaton materiaali. Betoni luokitellaan A1-luokkaan, joka korkein palokestävyysluokka. Betoni toimii luotettavana ja turvallisena palo-osastointi rakenteena. Betonirakenne kestää aina vähintään tunnin standardipalon lukuun ottamatta hoikkia rakenteita. Suojaamaton teräs kestää standardipaloa vain noin 15 minuuttia ja puurakenteet voivat kestää jopa 60 minuuttia. /10, s. 8–19/

Ilman lisähuokoistusta betoni on altis murtumaan kovassa pakkasessa, jos betonin huokosverkostossa on vettä jäätymisvaiheessa. Ongelma voidaan välttää lisäämällä lisähuokoistusainetta. Lisähuokoistuksesta betonimassaan muodostuu pieniä ilmahuokosia, johon laajeneva vesi jäätyessään pääsee tunkeutumaan vaurioittamatta betonia. /11/

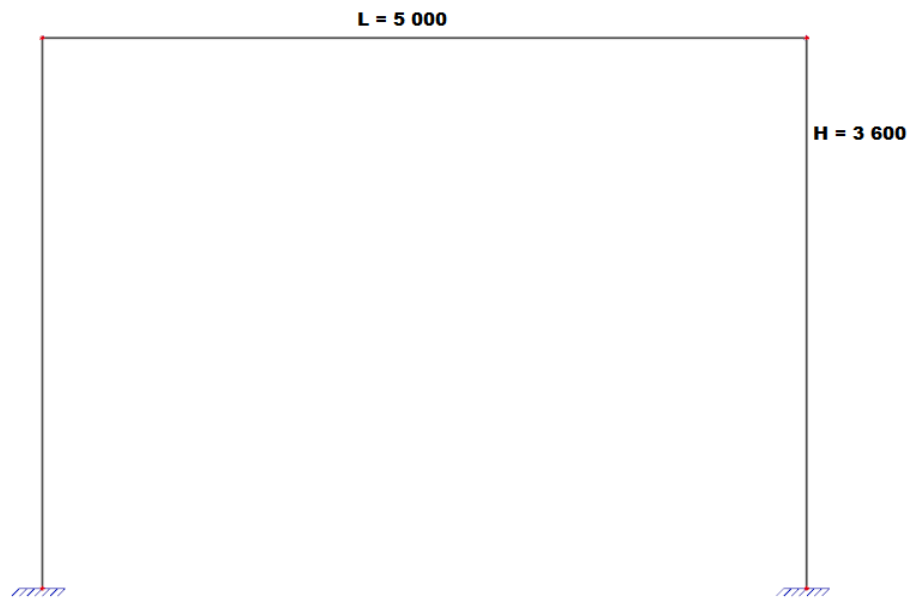
Betoni on hyvä kasvualusta mikrobeille, jos sen kosteusrasitetta ei estetä. Koska betoni ja muut kiviainekset ovat huokoisia, pääsevät kapillaarinen vesi ja muut eloperäiset aineet vaikuttamaan rakenteissa ja ne voivat aiheuttaa sisäilmassa ongelmia. Vaikka uusi, puhdas betoni on mikrobiologisesti kestävä, ajan kuluessa pinnalle kehittyy mikrobikasvustoa, mikä voi aiheuttaa sisäilmaongelmia. /12/

4 ESIMERKKIKOHTEN LASKELMAT

4.1 Lujuuslaskelmat

Opinnäytetyössä käytetyn esimerkkikohteen lasiaukon kantavien rakenteiden lujuuslaskelmat tehtiin SCIA-ohjelmistolla. Ohjelmisto laskee Eurokoodien ja kansallisten liitteiden kertoimilla automaattisesti. Vaikka lujuuslaskentaan on hyviä laskentaohjelmia, tulee suunnittelijan silti tietää ja osata laittaa oikeat kuormat ja kertoimet kuormiin ja tarpeen vaatiessa laskea tulokset käsin.

Lujuuslaskelmat tehtiin teräs-, puu- ja betonirakenteille. Esimerkkikohteen todelliset kuormat eivät ole tiedossa työtä kirjoitettaessa. Kuormien suuruus on valittu kohteen todennäköisten suunnitteluratkaisujen perusteella. Lujuuslaskelmat tehtiin jokaiselle materiaalille käyttämällä samanpituisia palkkeja ja pilareita. Laskelmissa laskettiin palkkien ja pilarien taivutus, käyttöaste, kiepahdus- ja nurjahduskestävyys sekä materiaalin paino. Palkki on yksiaukkoinen palkki ja palkin molemmat päät on tuettu nivelellisesti. Palkin pituus on 5 metriä ja hyötykuorma 15 kN/m ja pysyvä kuorma 20 kN/m. Pilarien pituus on 3,6 metriä ja pilarit kannattelevat palkkia. Kuvassa 2 on esitetty rakenteen mitat ja tuet. Laskennassa ei huomioida värähtelyä.

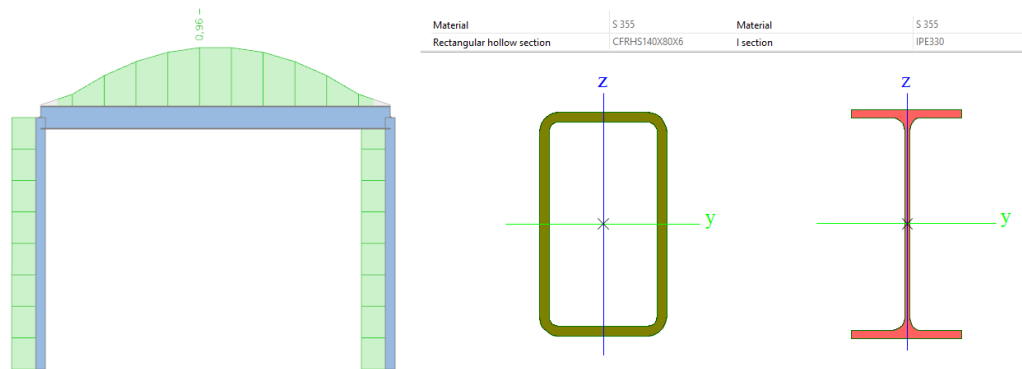


Kuva 2. Kehärakenteen mitat ja tukirakenteet.

Lisäksi eri materiaalien rakenneosat kuten palkit ja pilarit tarkastellaan käsin laskennalla. Käsin laskennassa käytetään materiaalin omaa Eurokoodia. Käsin laskennan tarkastelu tehdään siksi, että saadaan materiaalien kiepahdus- ja nurjahduskestävyys huomioitua.

4.1.1 Teräsrakenne

SCIA-ohjelmalla saatu teräspalkin käyttöasteeksi tuli 96 % IPE330-profiililla ja teräslaadulla S355, jonka myötölujuus f_y on 355 N/mm^2 . Pilarin käyttöasteeksi tuli 42 % Ruukin CFRHS 140x80x6 -profiililla. Rakenteen poikkileikkaukset ja käyttöaste on esitetty kuvassa 3. Koko rakenteen painoksi tuli 381,5 kg ja kokonaispinta-alaksi $9,3\text{ m}^2$.



Kuva 3. Teräsrakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkaus IPE330- ja CFRHS 140x80x6 -profiileista.

Käsin laskettuna teräksen plastinen taivutuskestävyys saadaan Eurocode 3 -suunnitteluohjeen kaavojen mukaan. Taivutuskestävyys eli $M_{c,Rd}$ määräytyy profiilin poikkileikkausluokan mukaan, joita on neljä. Poikkileikkausluokat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Poikkileikkausluokkien $M_{c,Rd}$ ratkaisukaavat.

	$M_{c,Rd} =$
Poikkileikkausluokka 1 ja 2	$W_p * f_y / \gamma_{M0}$
Poikkileikkausluokka 3	$W_{el} * f_y / \gamma_{M0}$
Poikkileikkausluokka 4	$W_{eff} * f_y / \gamma_{M0}$

IPE330-palkin poikkileikkausluokka on yksi, joten IPE330-palkin taivutuskestävyys saadaan laskettua seuraavilla arvoilla: $W_{pl} = 804 * 10^3 \text{ mm}^3$, $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ ja $\gamma_{M0} = 1$. Kun arvot syötetään kaavaan, saadaan tulokseksi $M_{c,Rd} = 285,42 \text{ kNm}$. Ehdon:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1, \text{ jossa} \quad (1)$$

M_{Ed} = taivutusmomentin mitoitusarvo,

tulee täyttyä. SCIA-ohjelma pystyy näyttämään palkin suurimman taivutusmomentin, joka on 135,46 kNm. Kun arvot sijoitetaan ehtolausekkeeseen, saadaan tulokseksi 0,47, joka on pienempi kuin yksi. /17, s. 53/

Palkin plastinen leikkauskestävyys saadaan ratkaisemalla $V_{pl,Rd}$.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v * f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ jossa} \quad (2)$$

A_v = leikkauspinta-ala.

IPE330 palkin leikkauspinta-ala saadaan kaavalla:

$$A_v = A - 2 * b * t_f + (t_w + 2r) * t_f, \text{ jossa} \quad (3)$$

$$A = 6\,261 \text{ mm}^2$$

$$b = 160 \text{ mm}$$

$$t_f = 11,5 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,5 \text{ mm}$$

$$r = 18 \text{ mm.}$$

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan leikkauspinta-alaksi $3\,081,25 \text{ mm}^2$. Kun leikkauspinta-ala on tiedossa, voidaan plastinen leikkauskestävyys ratkaista. IPE330-palkin plastiseksi leikkauskestävyydeksi saadaan $V_{pl,Rd} = 631,5 \text{ kN}$. Ehto:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1, \text{ jossa} \quad (4)$$

V_{Ed} = leikkausvoiman mitoitusarvo,

tulee täyttyä. SCIAsta otettu leikkausvoiman mitoitusarvo on $109,27 \text{ kN}$. Kun arvot sijoitetaan ehtolausekkeeseen, saadaan tulokseksi $0,17$, joka pienempi kuin yksi. /17, s.54/

Palkin kiepahduskestävyyden määrää ehto:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1, \text{ jossa} \quad (5)$$

$M_{b,Rd}$ = kiepahduskestävyyden mitoitusarvo.

Sauvat, joita ei ole tuettu sivusuunnassa, ovat alttiita kiepahdukselle. Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ jossa} \quad (6)$$

χ_{LT} = kiepahduskestävyyden pienennystekijä.

Kiepahduskäyrät voidaan laskea kahdella eri tavalla, yleisellä tai valssattujen ja vastaavien hitsattujen sauvojen menetelmällä. Työssä käytettiin yleistä menetelmää. Kiepahduskestävyyden pienennystekijä saadaan kaavalla:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}}, \text{ mutta } \chi_{LT} \leq 1. \quad (7)$$

Sauvojen muunnettu hoikkuus eli λ_{LT} , saadaan kaavalla:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}}, \text{ jossa} \quad (8)$$

M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen momentti kiepahdukselle. /17, s. 65–66/

M_{cr} , eli kimmoteorian mukainen kriittinen momentti, suuruus riippuu poikkileikkauksen muodosta (kaksoissymmetrinen ja asymmetrisyys), palkin päiden tuenan reunaehdoista, kuorman sijainnista ja tukipisteiden välillä olevan momenttipinnan muodosta. Kimmoteorian mukaisen kriittisen momentin lauseke sopii yhden akselin suhteen symmetrisille ja kaksoissymmetrisille poikkileikkauksille, mutta kertoimien C_1 , C_2 ja C_3 suuruudet riippuvat poikkileikkauksen symmetriyydestä. Kriittisen momentin lauseke on:

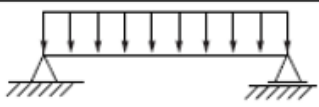

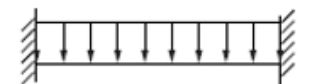

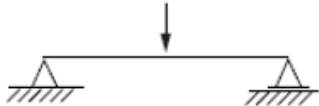
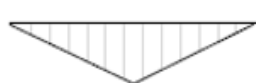

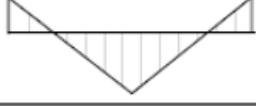
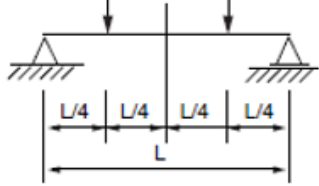

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr}^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{cr}^2 G I_T}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\}, \quad (9)$$

mutta kuorman vaikuttaessa kaksoissymmetrisissä poikkileikkauksissa, yksinkertaistuu kaava muotoon:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L_{cr}^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L_{cr}^2 G I_T}{\pi^2 E I_z}}. \quad (10)$$

Tekijät C1, C2 ja C3 saadaan ratkaistua momenttipinnan muodon perusteella, jotka on esitetty taulukossa 2 ja tehollisen pituuden kertoimet saadaan ratkaistua sauvojen tuennan tavasta taulukosta 3. Tässä tapauksessa tarvitsee ratkaista vain C1, joka on 1,132. Tekijä E on teräksen kimmokerroin, joka on 21 000N/mm². Tekijä G on teräksen liukukerroin, joka on 81 000 N/mm². L_{cr} on sauvan tehollinen jännemitta, joka on tässä tapauksessa 5 metriä. Tekijät I_z , I_w ja I_T ovat profiilin poikittainen jäyhyysmomentti, käyritysmisjäyhyysmomentti ja vapaan vääntön vääntövakio. I_z , I_w ja I_T saadaan poikkileikkausarvo taulukosta ja tässä tapauksessa $I_z = 788 * 10^4$, $I_w = 199\,097 * 10^6$ ja $I_T = 28,15 * 10^4$. Kun arvot sijoitetaan M_{cr} kaavaan, saadaan tulokseksi 329,3 kNm. /20/

Taulukko 2. Tekijöiden C1, C2 ja C3 arvot momenttipintojen ja tehollisen pituuden k kertoimen avulla.

Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k	Tekijöiden arvot		
			C1	C2	C3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

Taulukko 3. Tehollisen pituuden kertoimet eri tuentatapauksille.

Tuentatapaukset sauvan päissä pysty akselin ympäri tapahtuvan kiertymän suhteen	Poikkipinnan käyrityminen estetty sauvan molemmissa päissä	Poikkipinta voi käyristyä sauvan molemmissa päissä	Poikkipinnan käyrityminen estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi käyristyä
Kiertymä estetty sauvan molemmissa päissä	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,5$ $k_{\omega} = 0,7$
Kiertymä vapaa sauvan molemmissa päissä	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 1,0$ $k_{\omega} = 0,7$
Kiertymä estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,5$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 1,0$	$k = 0,7$ $k_{\omega} = 0,7$

Kun M_{cr} on tiedossa, voidaan ratkaista muunnettu hoikkuus kaavan (8) mukaan. Muunnetun hoikkuuden arvoksi saadaan 0,87. Kun muunnettu hoikkuus on tiedossa, voidaan ratkaista kaava:

$$\phi_{LT} = 0,5[1 + \alpha_{LT}(\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2], \text{ jossa} \quad (11)$$

α_{LT} = epätarkkuustekijä.

Kiepahduskäyriä vastaavan epätarkkuustekijän α_{LT} arvo saadaan taulukosta 4. Kun kyseessä valssattu I-profiili, tulee sen korkeuden ja leveyden suhdetta vertailla. Jos h/b suhde on pienempi tai yhtä suuri kuin kaksi, on kiepahduskäyrä tällöin a, joka on 0,21. Jos taas h/b suhde on suurempi kuin kaksi, on kiepahduskäyrä tällöin b, joka on 0,34. IPE330-poikkileikkauksen mitat ovat: $b = 160$ mm ja $h = 330$ mm. Korkeuden leveyden suhde on 2,06, joka suurempi kuin 2,0, jolloin epätarkkuustekijäksi saadaan arvo 0,34. /17, s. 66 – 67/

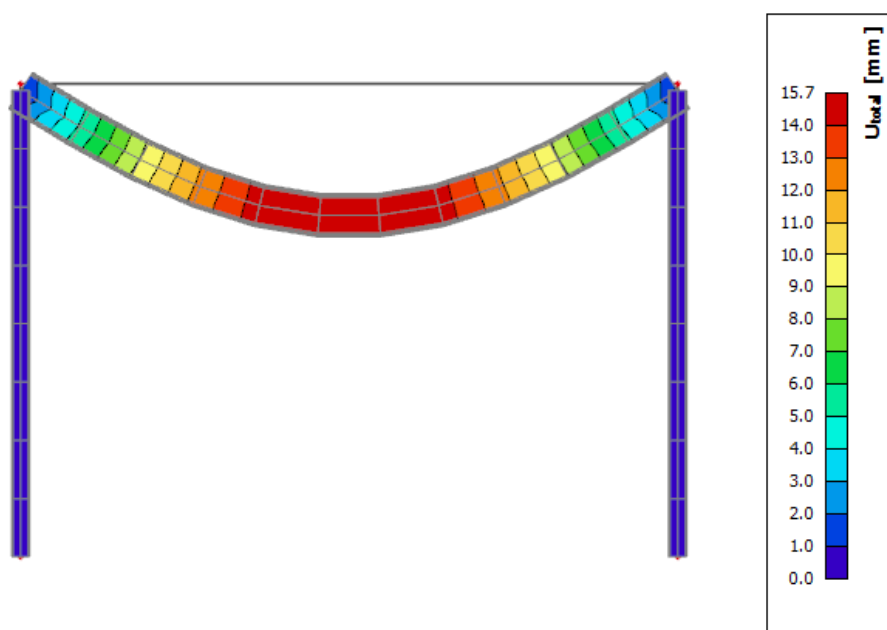
Taulukko 4. Kiepahduskäyrien suositeltavat epätarkkuustekijät.

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä			
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a			
	$h/b > 2$	b			
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c			
	$h/b > 2$	d			
Muut profiilit	-	d			
Kiepahduskäyrä	a	b	c	d	
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76	

Kun epätarkkuustekijä sijoitetaan kaavaan (11), saadaan ϕ_{LT} arvoksi 0,95. Kun kaikki tekijät ovat tiedossa, voidaan ratkaista kiepahduskestävyyden pienennystekijä, jonka arvoksi tuli 0,76. Kiepahduskestävyyden mitoitus arvoksi tällöin saa-

daan 215,62 kNm. Taivutusmomentin ja kiepahduskestävyyden suhteesta saadaan tulos 0,25, joka on pienempi kuin 1,0, jolloin palkki ei kiepahda. /17, s. 66–67/

SCIAsta saatu arvo teräspalkin maksimitaipumaksi oli 15,7 mm, joka on esitetty kuvassa 4. Taipuman raja-arvo saadaan jakamalla jänneväli luvulla 300. Tässä tapauksessa jänneväli on 5 m = 5 000 mm. Taipuman raja-arvoksi saadaan 16,6 mm, joten teräspalkin taipuma alittaa raja-arvon.



Kuva 4. Teräspalkin maksimitaipuma.

Pilarin CFRHS 140x80x6 poikkileikkausluokka on 1, joka saadaan Ruukin rakenneputket liite 11.1 sivulta 542. Täten pilarin puristuskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea kaavalla:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}, \text{ jossa} \quad (12)$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala.

Pilarin poikkileikkauksen pinta-ala on 2 403 mm² ja myötölujuus 355 N/mm². Tällöin pilarin mitoitettu puristuskestävyys on 853 kN. Ehdon:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1, \text{ tulee täyttyä.} \quad (13)$$

Pilarille tuleva maksimi puristusvoiman mitoitus arvo N_{Ed} on 116,17 kN. Kun arvot sijoitetaan ehtoon, saadaan arvoksi 0,14, joten ehto täyttyy. /17, s. 53/

Pilarit voivat myös nurjahtaa, joten pilareiden nurjahduskestävyys tulee varmistaa.

Pilarin nurjahduskestävyyden ehto:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1, \text{ tulee täyttyä.} \quad (14)$$

Puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo, eli $N_{b,Rd}$, saadaan kaavalla:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ jossa} \quad (15)$$

χ = nurjahduskestävyyden pienennystekijä.

Nurjahduskestävyyden pienennystekijä lasketaan saman tyyppisillä kaavoilla, kuin kiepahduksen pienennystekijä. Ensin pitää ratkaista muunnettu hoikkuus λ kaavalla:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}, \text{ jossa} \quad (16)$$

N_{cr} = kimmoteorian mukainen nurjahdusvoima.

Kimmenteorian mukainen nurjahdusvoima saadaan kaavalla:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2}, \text{ jossa} \quad (17)$$

k = nurjahduserroin (kuva 10).

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan kimmoteorian mukaiseksi nurjahdusvoimaksi 23,9 kN. Kun nurjahdusvoima on tiedossa, saadaan muunnettu hoikkuus ratkaistua. Muunnetuksi hoikkuudeksi saatiin 0,0386. Kun muunnettu hoikkuus on selvillä, voidaan ratkaista kaava:

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2], \text{ jossa} \quad (18)$$

α = epätarkkuustekijä.

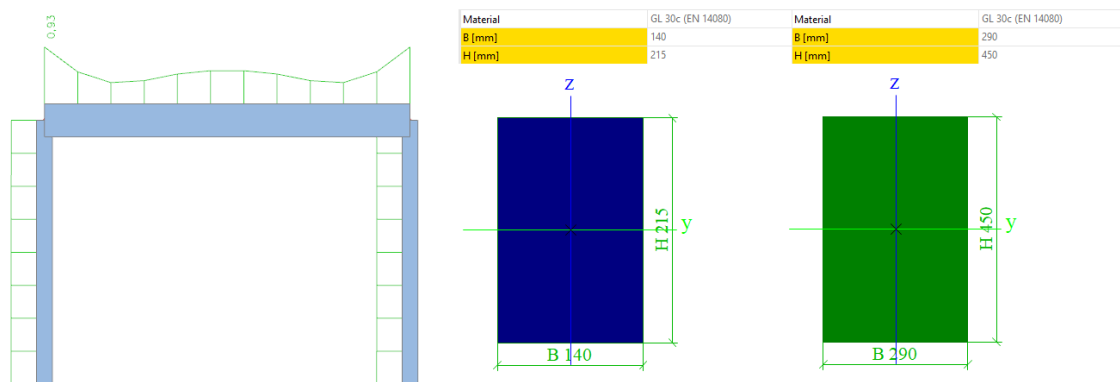
Epätarkkuustekijä saadaan SFS-EN 1993-1-1 taulukosta 6.1: Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijä ja taulukosta 6.2: Nurjahduskäyrien valinta poikkileikkauksen mukaan. Pilarin profiili on kylmävalssattu putki, jonka nurjahduskäyrä on c, joten epätarkkuustekijä α on 0,49. Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan tulokseksi 0,46, jonka jälkeen nurjahduksen pienennystekijä χ voidaan laskea kaavalla:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (19)$$

Nurjahduksen pienennystekijäksi saadaan 1,0. Kun nurjahduksen pienennystekijä tiedetään voidaan ratkaista $N_{b,Rd}$, jonka tulokseksi saadaan 853 kN. Kun nurjahduskestävyyden mitoitusarvo sijoitetaan ehtoon, saadaan tulokseksi 0,14, jolloin ehto täyttyy ja pilari ei nurjahda. /17, s. 61–63/

4.1.2 Puurakenne

Puupalkin käyttöasteeksi tuli 93 %. Palkin mitat ovat huomattavasti suurempia kuin teräksen. Palkin ja pilareiden materiaali on liimapuuta ja puulaatu on GL 30c. Palkin leveys on 290 mm ja korkeus 450 mm. Pilareiden käyttöasteeksi tuli myös 42 %. Pilarin leveys on 140 mm ja korkeus 215 mm, jotka on esitetty kuvassa 5. Puupalkin painoksi tuli 373,8 kg ja pinta-alaksi 12,5 m².



Kuva 5. Puurakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkauksien mitat.

GL30c-liimapuupalkin taivutuslujuuden ominaisarvo $f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$ ja vetolujuuden ominaisarvo $f_{t,0,k} = 20 \text{ N/mm}^2$. Suorakaiteen muotoiselle liimapuupalkille

poikkileikkauksen vertailukorkeus ja -leveys on 600 mm. Jos palkin poikkileikkaus on alle 600 mm, voidaan taivutuslujuuden ja vetolujuuden ominaisarvoja suurentaa K_h kertoimella:

$$K_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,1 \right\}, \text{ jossa} \quad (20)$$

h = palkin korkeus tai leveys.

Kun palkin korkeus (450 mm) sijoitetaan kaavaan, saadaan arvoksi 1,029, joka on pienempi kuin 1,1. Palkin taivutuslujuuden mitoitusarvoiksi saadaan tällöin $30 \text{ N/mm}^2 * 1,02 = 30,88 \text{ N/mm}^2$ ja vetolujuuden mitoitusarvoiksi $20 \text{ N/mm}^2 * 1,02 = 20,4 \text{ N/mm}^2$. GL30c-liimapuun materiaaliominaisuudet saa myös SKOL-ohjelman kautta esitetty kuvassa 6. /18, s. 30/

Materiaaliominaisuudet

γ_M	1,25		<i>Materiaalin osavarmuusluku</i>
k_{mod}	0,70		<i>Muunnoskerroin</i>
k_{def}	0,80		<i>Virumaluku</i>
k_h	1,03		<i>Taivutuslujuuden korotuskerroin</i>
$f_{m,y,k}$	30,88	N/mm^2	<i>Taivutuslujuuden ominaisarvo</i>
$f_{v,k}$	3,50	N/mm^2	<i>Leikkauslujuuden ominaisarvo</i>
$f_{c,90,k}$	2,50	N/mm^2	<i>Puristuslujuuden ominaisarvo</i>
$E_{0,mean}$	13000	N/mm^2	<i>Kimmomoduuli</i>
$E_{0,05}$	10800	N/mm^2	<i>Kimmomoduuli</i>
G_{mean}	650	N/mm^2	<i>Liukumoduuli</i>
$f_{m,y,d}$	17,29	N/mm^2	<i>Taivutuslujuuden laskenta-arvo</i>
$f_{v,d}$	1,96	N/mm^2	<i>Leikkauslujuuden laskenta-arvo</i>
$f_{c,90,d}$	1,40	N/mm^2	<i>Puristuslujuuden laskenta-arvo</i>

Kuva 6. Liimapuu GL30c-palkin materiaaliominaisuudet.

Palkin kiepahduskestävyys sekä taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutuksesta tulee täyttyä ehto:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d}, \text{ jossa} \quad (21)$$

$\sigma_{m,d}$ = taivutusjännityksen mitoitusarvo,

$f_{m,d}$ = puristuslujuuden mitoitusarvo syynsuuntaisessa puristuksessa,

k_{crit} = kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kiepahdusriskin takia pienentynyt taivutuskestävyys.

Ennen kuin voidaan määrittää k_{crit} kerroin, tulee määrittää suhteellinen hoikkuus $\lambda_{rel,m}$, joka määritetään kaavalla:

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}, \text{ jossa} \quad (22)$$

$\sigma_{m,crit}$ = kriittinen taivutusjännitys.

Kriittinen taivutusjännitys voidaan laskea klassisen stabiiliusteorian mukaan, kun käytetään 5 % fraktiiliä vastaavia arvoja jäykkyysuureille. Kriittinen taivutusjännitys saadaan kaavalla:

$$\sigma_{m,crit} = \frac{cb^2}{hL_{ef,y}} * E_{0,05}, \text{ jossa} \quad (23)$$

$$c = 0,7$$

$E_{0,05}$ = 5 % (alempaa) fraktiilia vastaava, syynsuuntaista kuormitusta vastaava kimmokerroin = 10 800 N/mm²

$L_{ef,y}$ = palkin tehollinen pituus = 5 400 mm

W_y = taivutusvastus vahvemman akselin y suhteen = 9 787 500 mm³

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan kriittiseksi taivutusjännitykseksi arvo 261,64 N/mm². Kun kriittinen taivutusjännitys on tiedossa, voidaan määrittää suhteellinen hoikkuus. Suhteelliseksi hoikkuudeksi saatiin 0,34, josta saadaan määritettyä k_{crit} kerroin:

$$k_{crit} = \begin{cases} 1, & \text{kun } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m}, & \text{kun } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2}, & \text{kun } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases} . \quad (24)$$

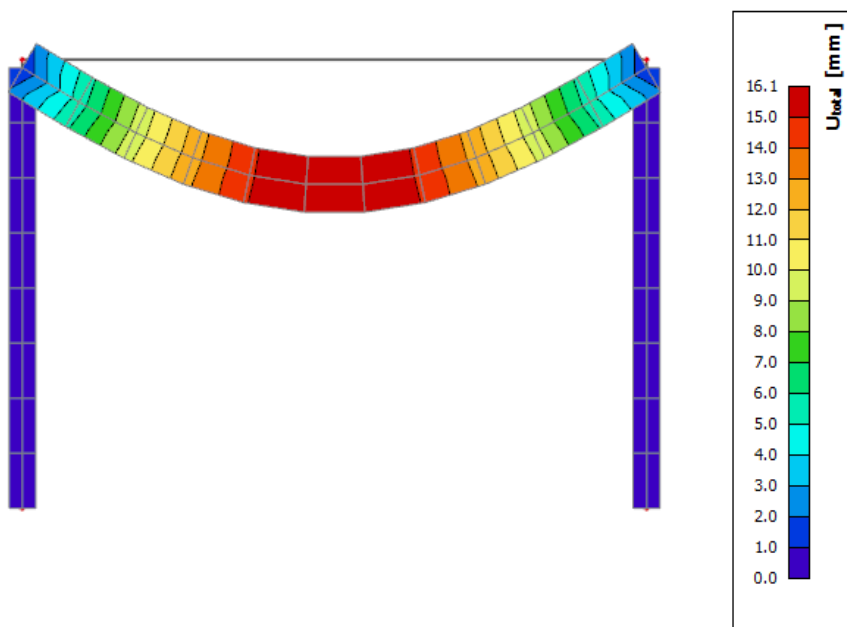
Kun suhteellinen hoikkuus on pienempi kuin 0,75, saadaan k_{crit} kertoimeksi 1,0. Taivutusjännityksen mitoitusarvo saadaan kaavalla:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{d,max}}{W_y}, \text{ jossa} \quad (25)$$

$M_{d,max}$ = kuormasta aiheutuva maksimi momentti = 142,82 kNm.

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan taivutusjännityksen mitoitusarvoksi 14,6 N/mm². Kun arvot sijoitetaan ehtoon (21), huomataan että kiepahdusta ei tapahdu, koska ehto täyttyy. /18, s. 41–43/

Puupalkin maksimitaipumaksi tuli 16,1 mm, joka on suurin taipuma kaikista kolmesta materiaalista. Kuvassa 7 on esitetty puupalkin maksimitaipuma. Puupalkin maksimi taipuma alittaa kuitenkin taipumarajan, joka on 16,6 mm.



Kuva 7. Puupalkin maksimitaipuma.

Pilareiden tarkastelussa tulee huomioida nurjahduskestävyys Z- ja Y-suunnassa. Pilarin materiaaliominaisuudet ovat samat kuin palkilla, mutta pilarin poikkileikkaus on pienempi. Poikkileikkausvakioiden ratkaisukaavat kuvassa 8. Pilarin poikkileikkausvakiot ovat: $b = 140 \text{ mm}$, $h = 215 \text{ mm}$, $A = b \cdot h = 30\,100 \text{ mm}^2$, $W_y = 1,08 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$, $I_y = 115,9 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ ja $I_z = 49,16 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$ (kuva 13).

$$\begin{aligned}
 A &= b \cdot h \\
 W_y &= \frac{b \cdot h^2}{6} \\
 I_y &= \frac{b \cdot h^3}{12} \\
 I_z &= \frac{b \cdot h^3}{12}
 \end{aligned}$$

Kuva 8. Poikkileikkausvakioiden ratkaisukaavat.

Nurjahduskestävyyden Z-suunnassa vaikuttaa puristava kuorma $N_d = 115,73 \text{ kN}$ ja momentti M_d , joka on tässä tapauksessa nolla. Arvot saadaan SCIA-ohjelmasta. Pilarin pituus $L = 3\,600 \text{ mm}$ ja nurjahduspituus $L_{c,z}$ saadaan, kun pilarin pituus kerrotaan kertoimella 2,5, jolloin saadaan nurjahduspituudeksi $9\,000 \text{ mm}$. Pilarin jäyhyyssäde i_y saadaan kaavalla:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}. \quad (26)$$

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan jäyhyysäteeksi 62 mm . Kun jäyhyyssäde on tiedossa, voidaan ratkaista hoikkuus λ_y kaavalla:

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y}. \quad (27)$$

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan hoikkuudeksi $145,2$. Tämän jälkeen voidaan selvittää muunnettu hoikkuus $\lambda_{rel,y}$ kaavalla:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \text{ jossa} \quad (28)$$

$f_{c,0,k}$ = puristuslujuuden ominaisarvo = 24,5 N/mm².

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan muunnetuksi hoikkuudeksi 2,2. K_y on kerroin, jota tarvitaan nurjahduskertoimen $k_{c,y}$ ratkaisemiksi. K_y kerroin saadaan kaavalla:

$$k_y = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2), \text{ jossa} \quad (29)$$

β_c = alkukäyryydestä riippuva kerroin = 0,10.

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan k_y kertoimeksi 3,02. Tämän jälkeen voidaan ratkaista nurjahduskerroin $k_{c,y}$ kaavalla:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1. \quad (30)$$

Kun arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan nurjahduskertoimeksi 0,197, joka on pienempi kuin yksi. Pilarin puristusjännitys $\sigma_{c,0,d}$ saadaan kaavalla:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} \quad (31)$$

Puristusjännitykseksi saadaan 3,84 N/mm². Koska tässä tapauksessa pilarille ei tule momenttia, ei tarvitse laskea taivutusjännitystä. Kun kuormien arvot ja materiaalin ominaisuudet ovat tiedossa (kuva 14), voidaan ratkaista ehdot:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1, \text{ ja} \quad (32)$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (33)$$

Kun arvot sijoitetaan ehtoihin, saadaan ensimmäisestä ehdosta arvoksi 1,42 ja toisesta ehdosta 0,078. Vaikka taivutuksen ja puristuksen yhteisvaikutuksen ehto (33) täyttyi, pilari nurjahtaa kuormasta, koska ensimmäisen ehdon arvo ylittää ehdon raja-arvon. Nurjahdus voidaan estää poikkileikkauksen leveyttä suurentamalla.

la. Tarkastelua suuremmalla poikkileikkauksella, kuitenkin tarvinnut toimeksiantajan puolesta tehdä. GL30c-liimapuun materiaaliominaisuudet saa myös SKOL-ohjelman kautta esitetty kuvassa 9. /18, s. 41–42/

Materiaaliominaisuudet

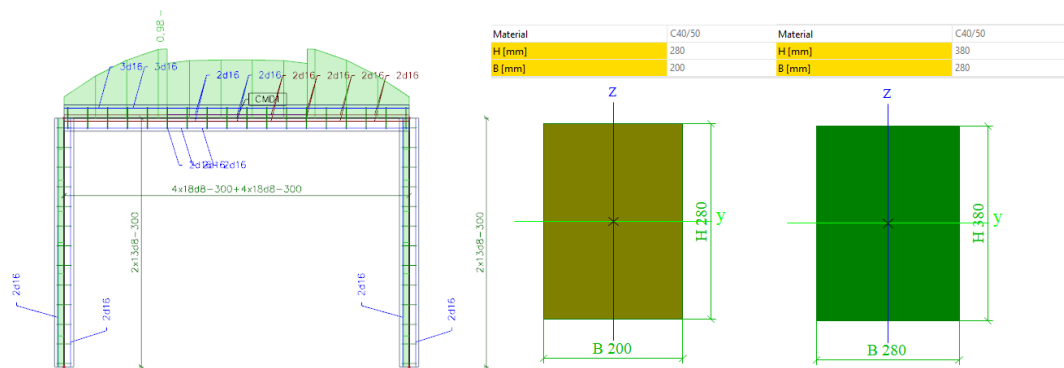
γ_M	1,25		<i>Materiaalin osavarmuusluku</i>
k_{mod}	0,70		<i>Muunnoskerroin</i>
$f_{c,0,k}$	24,50	N/mm ²	<i>Puristuslujuuden ominaisarvo</i>
k_{ft}	1,10		<i>Taivutuslujuuden korotuskerroin (Z-suunnassa)</i>
$f_{m,y,k}$	33,00	N/mm ²	<i>Taivutuslujuuden ominaisarvo Z-suunnassa</i>
$f_{m,z,k}$	30,00	N/mm ²	<i>Taivutuslujuuden ominaisarvo Y-suunnassa</i>
$f_{v,k}$	3,50	N/mm ²	<i>Leikkauslujuuden ominaisarvo</i>
$E_{0,mean}$	13000	N/mm ²	<i>Kimmomoduuli</i>
$E_{0,05}$	10800	N/mm ²	<i>Kimmomoduuli</i>
$f_{c,0,d}$	13,72	N/mm ²	<i>Puristuslujuuden laskenta-arvo</i>
$f_{m,y,d}$	18,48	N/mm ²	<i>Taivutuslujuuden laskenta-arvo Z-suunnassa</i>
$f_{m,z,d}$	16,80	N/mm ²	<i>Taivutuslujuuden laskenta-arvo Y-suunnassa</i>
$f_{v,d}$	1,96	N/mm ²	<i>Leikkauslujuuden laskenta-arvo</i>

Kuva 9. Liimapuu GL30c-pilarin materiaaliominaisuudet.

Nurjahduskestävyys Y-suunnassa lasketaan samalla periaatteella, kuin nurjahduskestävyys Z-suunnassa. Arvot jotka muuttuvat Z-suunnan tarkastelussa ovat: $L_{c,y} = 3\,600$ mm, $I_z = 49,16 \cdot 10^6$ mm⁴, $i_z = 40,41$ mm, $\lambda_z = 89,08$ ja $\lambda_{rel,z} = 1,35$. Y-suunnan nurjahduskertoimeksi saadaan tällöin 0,49. Tällöin ensimmäisen ehdon (32) tulokseksi saadaan 0,57 ja toisen ehdon (33) tulokseksi 0,078. Koska molempien ehtojen arvo oli pienempi kuin yksi, nurjahdusta Y-suuntaan ei tapahdu. /18, s. 41–42/

4.1.3 Betonirakenne

Betonipalkin käyttöasteeksi saatiin 98 %. Betonipalkin taipuma oli 1,6 mm. Palkin leveydeksi tuli 280 mm ja korkeudeksi 380 mm. Pilareiden käyttöasteeksi tuli 8 %. Pilareiden leveydeksi tuli 200 mm ja korkeudeksi 280 mm. Betonin laatu on C40/50 ja terästen laatu B 500A. Koska betoni ei kestä vetoa, joudutaan betoni yleensä raudoittamaan. Betonipalkin kokonaismassaksi tuli 2 338 kg ja kokonaispinta-alaksi 13,5 m². Kuvassa 10 on esitetty rakenteiden poikkileikkaukset, käyttöaste ja lisäraudoitus.



Kuva 10. Betonirakenteisen kehärakenteen pilareiden ja palkin käyttöaste, sekä poikkileikkauksien mitat.

Betonipalkin poikkileikkauksen taivutuskestävyys saadaan kaavalla:

$$M_{pl,Rd} = b * d^2 * f_{cd} * \mu, \text{ missä} \quad (34)$$

b = poikkileikkauksen leveys

d = poikkileikkauksen tehollinen korkeus = 325 mm

f_{cd} = betonin lieriölujuuden ominaisarvo = 22,7 N/mm²

μ = suhteellinen momentti = 0,35

Kun poikkileikkauksen arvot sijoitetaan kaavaan, saadaan palkin taivutuskestävyydeksi 234,9 kNm. Palkkina betoni kestää taivutusta melkein saman kuin teräs. Betonin vetolujuus on vain 1/10 sen puristuslujuudesta, joten siksi betonipalkki joudutaan raudoittamaan. Mitoittava momentti saadaan SCIA-ohjelman pohjasta, joka on 150,14 kNm, joten vetoraidoitus voidaan määrittää momentin suhteen. Mitoittavan momentin tulee olla pienempi kuin taivutuskestävyyden. Suhteellinen momentti saadaan kaavalla:

$$\mu \geq \frac{M_d}{f_{cd} b d^2}. \quad (35)$$

Suhteellisen momentin arvoksi saadaan 0,22. Suhteellinen korkeus β saadaan kaavalla:

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (36)$$

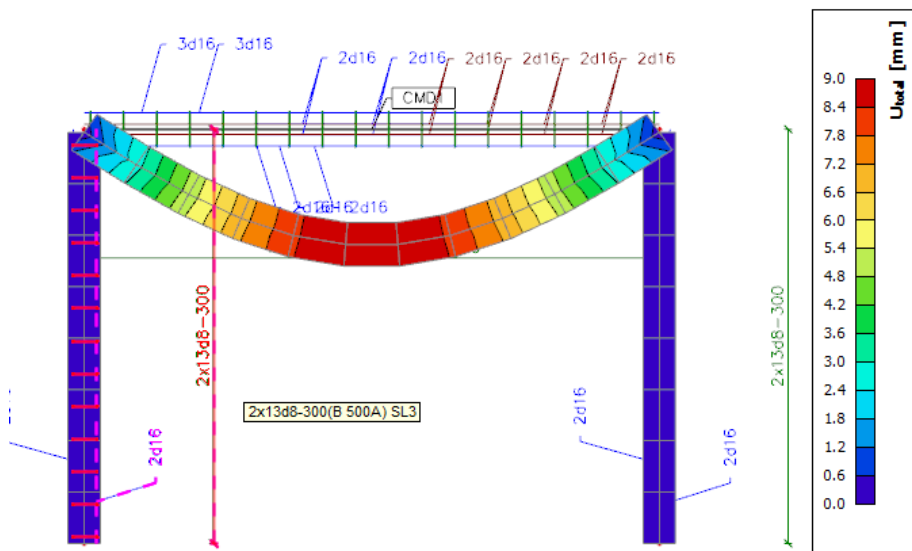
Suhteelliseksi korkeudeksi saadaan 0,25, joka on sama kuin mekaaninen raudoitussuhde ω . Vaadittava teräspinta-ala A_s saadaan kaavalla:

$$A_s \geq \omega b d \frac{f_{cd}}{f_{sd}}, \text{ jossa} \quad (37)$$

f_{sd} = teräslaatu = 435 N/mm².

Vaadittavaksi teräspinta-alaksi saadaan 1 187,2 mm². T20-teräksen halkaisija on 20 mm ja pinta-ala 314 mm². Jos T20 teräsiä laittaa 4 kappaletta, saadaan vetoteräksien pinta-alaksi 1 256 mm², joka on suurempi määrä kuin vaadittava teräspinta-ala. /19, s. 1–4, 10–13/

Betonipalkin maksimitaipumaksi tuli 9,0 mm, mikä on esitetty kuvassa 11. Betonipalkin taipuma on pienin kaikista rakennusmateriaaleista. Palkin taipuma alittaa taipuman raja-arvon 16,6 mm.



Kuva 11. Betonipalkin maksimitaipuma.

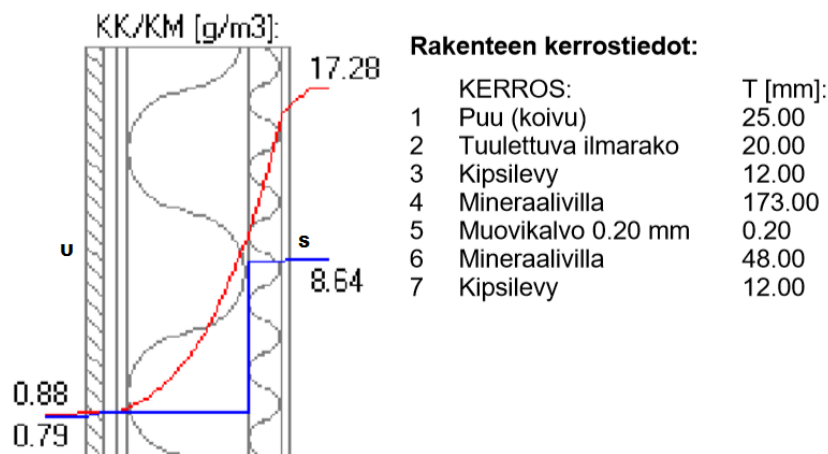
4.1.4 Yhteenveto

Teräs on lujuusluokaltaan suurin. Teräs kestää saman määrän kuormaa kuin puu ja betoni, mutta teräksen pinta-ala ja paino ovat pienemmät kuin puulla ja betonilla.

Teräspalkin pinta-ala on 25 % pienempi kuin puun ja 31 % pienempi kuin betonin pinta-ala. Teräksen taivutuslujuus on suurin, mutta vain 21 % suurempi kuin betonilla. Puun taivutuslujuus oli kolmesta materiaalista pienin. Teräs sopii materiaaleista parhaiten kantavaksi palkiksi, mutta betoni, suuren puristuslujuuden takia, toimii parhaiten pilarina. Esimerkiksi betoni C40/50 puristuslujuuden ominaisarvo lieriölle on 34 MPa (34 000 kN/m²) ja kuutiolle 43 MPa (43 000 kN/m²). Betoni on myös halvempaa kuin teräs, joten hyödyntämällä terästä ja betonia, saadaan kustannustehokkain ja kestävin ratkaisu.

4.2 Kosteuslaskelmat

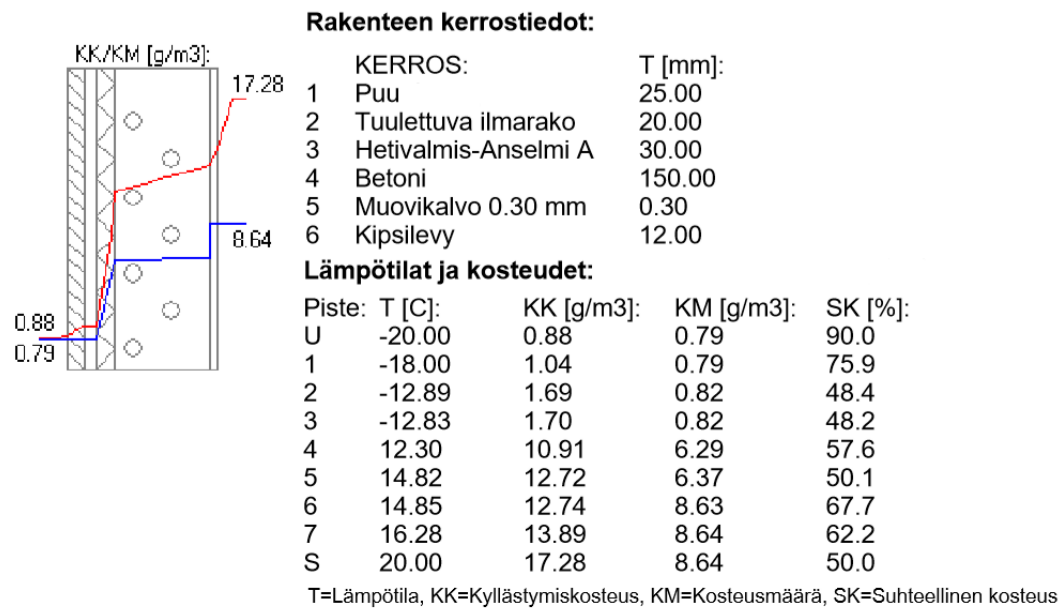
Kosteuden siirtymistä rakenteissa tarkasteltiin DOF-lämpöohjelman avulla. DOF-lämpöohjelmaan saadaan syötettyä rakenteiden rakennekerrokset. Tuloksista nähdään vuoden kolmen kylmimmän päivän keskiarvo lämmön ja kosteuden käyttäytymisestä rakenteissa yhden nelimetrisen alueelta. DOF-lämpöohjelman tuloksia on helppo tulkita. Kuvassa 12 on esimerkki DOF-lämpöohjelman tuloksista.



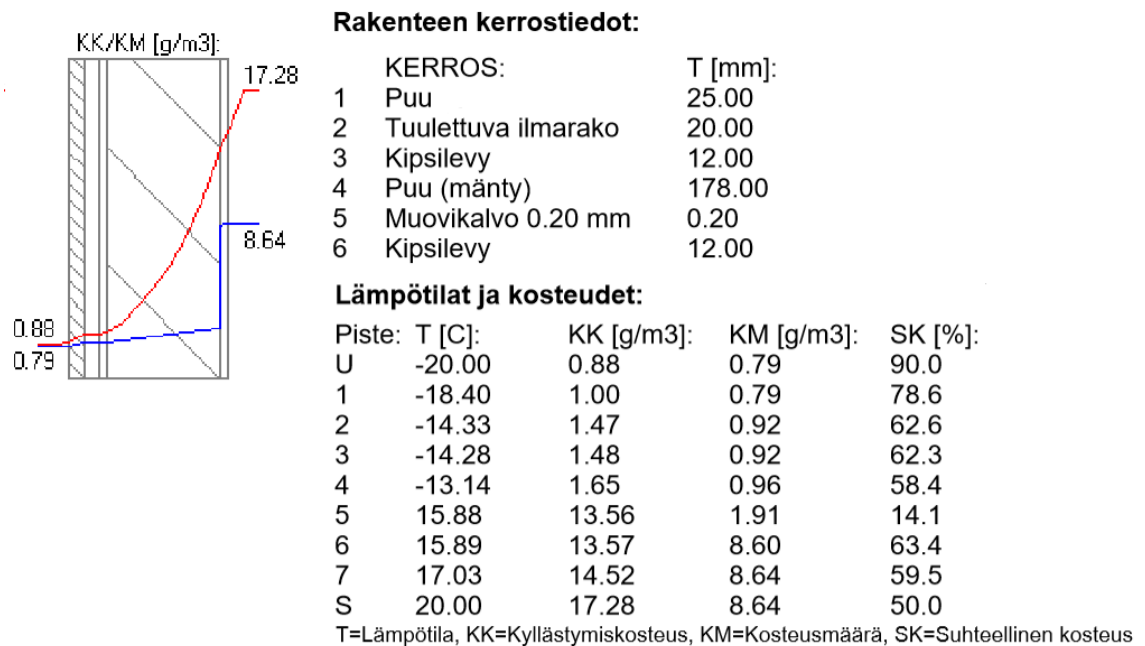
Kuva 12. Esimerkkirakenne DOF-lämpö ohjelman tuloksesta. Kun lämpökäyrä eli punainen viiva ja kosteuskäyrä eli sininen viiva eivät kohtaa, kastepistettä ei synny.

Runkomateriaalit muutettiin betoniksi, puuksi ja teräkseksi ja tarkasteltiin tulokset kaikilla kolmella vaihtoehdolla. Kaikista kolmesta ratkaisusta saatiin kosteusteknisesti toimiva rakenne. Vaihtoehtojen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet on esitetty kuvissa 13, 14 ja 15. Rakenteet tulee suunnitella siten, että rakenne toimii

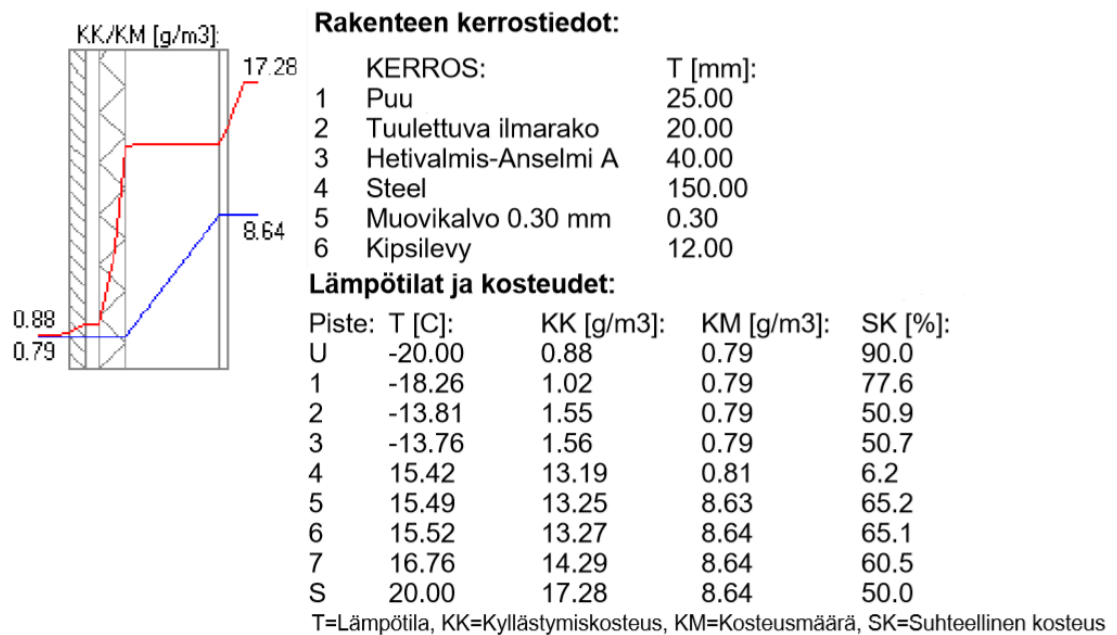
koosteusteknisesti, jotta ei synny sisäilmaongelmia ja hometta. Rakenteen kosteusmäärä ei saa ylittää kyllästymiskosteutta. Jokaisella rakennusmateriaalilla on oma kyllästymiskosteus. Jotkin materiaalit, kuten esimerkiksi puukuitueristeet, ovat hygroskooppisia materiaaleja, jotka pystyvät sitomaan kosteutta itseensä ja vapauttamaan sitä. Hygroskooppiselle materiaalille on suunniteltava riittävä tuuletus, jotta materiaali pystyy luovuttamaan kosteutta. /15 s. 21–23/



Kuva 13. Betonirunkorakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet.



Kuva 14. Puurunkorakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet.



Kuva 15. Teräsrunkorakenteen rakennetiedot, lämpötilat ja kosteudet.

4.3 Kustannuslaskelmat

Kustannuslaskelmissa käytettiin Rakennustieto RT-kustannuslaskentaohjelmaa. Laskelmissa esitetään työvaiheiden panokset ja materiaalin kustannukset. Materiaalien kuljetusta ei huomioida laskelmissa. Laskelmissa on huomioitu vain raken-

nuksen julkisivuaukon kantava kehärakenne eli pilarit ja palkki. Tarvittavien palkkien määrä on yhteensä 17,4 juoksumetriä ja tarvittavien pilareiden määrä on yhteensä 24 juoksumetriä.

Halvin vaihtoehto on puurunkoinen rakenne. Laskelmien kokonaiskustannukseksi tuli 1 632 €. Kustannuksiin sisältyy materiaalin kustannukset ja asennustyöt. Asennustyössä käytettiin kahta rakennustyöntekijää. Kalleimmaksi vaihtoehdoksi tuli teräsrunkoinen rakenne. Laskelmien kokonaiskustannukseksi tuli 2 857 €. Betonirunkoinen rakenteen kokonaiskustannukseksi tuli 2 524 €. Yhdistämällä teräs ja betoni niin, että palkkina toimii teräspalkki ja pilareina teräsbetonipilarit, saadaan kustannukseksi 3 044 €. Taulukossa 5 on eritelty kustannukset. Kaikkien rakenteiden paketit ja panokset ovat eriteltynä liitteissä 4, 5, 6 ja 7.

Taulukko 5. Materiaalien kustannukset eriteltynä.

Betoni	Määrä (jm)	Materiaalit (€)	Työ (€)	Yht. (€)
Palkki	17,4	745	641	1404
Pilarit	24	688	470	1182
				2586
Puu	Määrä (jm)	Materiaalit (€)	Työ (€)	Yht. (€)
Palkki	17,4	871	116	1004
Pilarit	8	430	215	654
				1658
Teräs	Määrä (jm)	Materiaalit (€)	Työ (€)	Yht. (€)
Palkki	17,4	1 779	127	1 924
Pilarit	24	727	224	975
				2899
Betoni + Teräs	Määrä (jm)	Materiaalit (€)	Työ (€)	Yht. (€)
Palkki	17,4	1779	127	1924
Pilarit	24	688	470	1182
				3106

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Laskelmien perusteella voidaan todeta, että yhdistämällä teräs ja betoni, saadaan kestävin kantava rakenne. Kosteusteknisesti kaikki kolme materiaalia toimivat. Vaikka betoni ja teräs molemmat kestävätkin rasiusta paremmin kuin puu, on puu kaikista materiaaleista halvin materiaali- sekä työkustannuksiltaan. Puu on myös ekologisin vaihtoehto. Teräs on kallein rakennusmateriaali kolmesta, mutta luotettavin.

Puu sopii hyvin pienien julkisivuaukkojen kuten ikkunoiden ja ovien, kantavaksi ratkaisuksi, mutta kun jännevälit kasvavat, on teräs kestävämpi ratkaisu. Lujuuslaskennassa käytetyn puupalkin ja -pilarin mitat ovat niin isoja, että ne kuuluvat ns. erikoistuotteisiin. Tarpeeksi suurilla poikkileikkausmitoilla tai pienemmillä jänneväleillä, puusta saisi hyvän kantavan rakenteen. Teräs pystyy kannattelemaan palkkina parhaiten kuormaa verrattuna pinta-alaan. Betonin puristuslujuudesta on hyötyä pilarina, mutta betonipilari joudutaan raudoittamaan vedolle.

Betonin ja teräksen kustannukset ovat vain suuntaa antavia, sillä RT-laskennan pohjassa ei ollut samoja poikkileikkauksia ja profiileja, mitkä ovat lujuuslaskennassa. Kustannuslaskennassa tuli kalleimmaksi vaihtoehdoksi yhdistää teräs ja betoni. Vaihtoehdon vahvuutena on sen kestävyys.

Jos kyseessä on pieni tai keskisuuri julkisivuaukko, puu sopii parhaiten kantavaksi rakenteeksi. Jos jännevälit ja kuormat ovat suuria, silloin teräs ja betoni ovat paremmat vaihtoehdot. Kuitenkin jokaiselle hankkeelle on eri lähtökohdat ja vaatimukset, jotka täytyy ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Myös asiakkaan vaatimukset vaikuttavat materiaalin valintaan.

LÄHTEET

/1/ SFS-EN 13830. Julkisivujärjestelmät. Tuotestandardi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2015.

/2/ Pentti, M. 2014. RIL 255-1-2014 – Rakennusfysiikka 1. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitti RIL ry.

/3/ RT 38-1102. 2011. Rakennuslasit, profiililasit. Rakennustietosäätiö RTS.

/4/ Väisänen, P. 2007. Teräs, perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. Väisänen, P. Vammalan kirjapaino Oy

/5/ Puurakentaminen. 2006, 11. Viitattu 27.01.2020.
<https://www.rakentaja.fi/artikkelit/595/puurakentaminen.htm>

/6/ Betoni. Käyttö talonrakentamisessa. Viitattu 27.01.2020.
<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/kaytto-talonrakentamisessa/>

/7/ Betoni. Betonin ominaisuudet ja käyttö. Viitattu 28.01.2020.
<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto/>

/8/ Betoni. Kosteudenkestävyys. Viitattu 28.01.2020. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/kosteudenkestavyys/>

/9/ Betoni. Betonin lujuus. Viitattu 28.01.2020. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/>

/10/ Betonikeskus ry. Betonirakenteiden ympäristöominaisuudet. 2007. Helsinki

/11/ Betoni. Betonin vaurioituminen. Viitattu 29.01.2020.
<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-vaurioituminen/>

/12/ Pitkäranta, M. 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 2016. Ympäristöministeriö. Turenki. Hansaprint Oy

/13/ Yritys, verkkosivusto. LPJ-Rakennus Oy. Viitattu 10.02.2020. <https://lpj-rakennus.fi/>

/14/ Hahtokari, T. Rakennusfysiikka. Vaasan ammattikorkeakoulu.

/15/ Pentti, M. 2014. RIL 255-2004 – Rakennusfysiikka 1. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitti RIL ry.

/16/ Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus, Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. Ympäristöministeriö.

/17/ SFS-EN 1993-1-1. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Standardi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2005.

/18/ SFS-EN 1995-1-1. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Standardi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2014.

/19/ Hahtokari, T. Betonirakenteet. 20.10.2017. Vaasan ammattikorkeakoulu.

/20/ Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Liite L3.6 Kimmoteorian mukainen kriittinen momentti M_{cr} kiepahduksen suhteen. 2014. Teräsrakenneyhdistys ry.

LIITE 1

Rakennuskohde:

Sisältö:

Suunnittelija:

Päiväys:

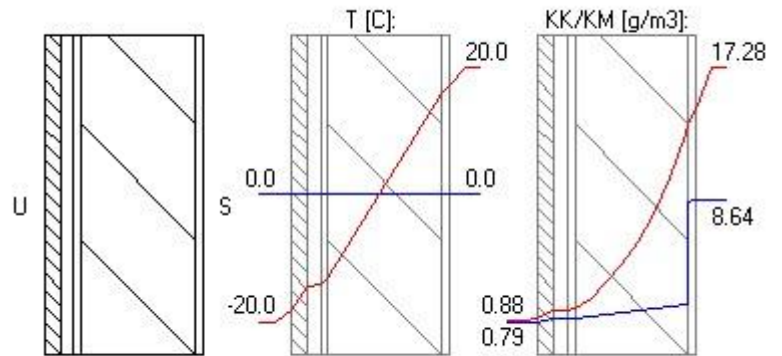
Tunnus:

17.2.2020

Rakenteen päätiedot:

U-arvo: 0.571 W/m²K
Paksuus: 247.200 mm
Pinta-ala: 1.00 m²
Paino: 129.42 kg
Hinta: 0.00 euro

Vesihöyryn vastus: 146781.483
Vesih. läpäisykerroin: 0.000007 g/m²hPa
Lämmönvastus: 1.753 m²K/W
Pintavastus, ulko: 0.070 m²K/W
Pintavastus, sisä: 0.130 m²K/W
Kulma (0-90): 90.000

**Rakenteen kerrostiedot:**

Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)

KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [gm/Nh]:	Hinta [e/m ³]:	Paino [kg/m ³]:
1 Puu (koivu)	25.00	0.1400	1.000000e-05	0.00	600.00
2 Tuulettuva ilmarako	20.00	10.0000	1.000000e+01	0.00	0.00
3 Kipsilevy	12.00	0.2400	1.620000e-05	0.00	1200.00
4 Puu (mänty)	178.00	0.1400	1.000000e-05	0.00	480.00
5 Muovikalvo 0.20 mm	0.20	0.3400	1.600000e-09	0.00	900.00
6 Kipsilevy	12.00	0.2400	1.620000e-05		1200.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

Lämpötilat ja kosteudet:**3:n päivän kylmin (0.0 h)****Lisätiedot:**

Piste:	T [C]:	KK [g/m3]:	KM [g/m3]:	SK [%]:	C [g/m2]:
U	-20.00	0.88	0.79	90.0	0.00
1	-18.40	1.00	0.79	78.6	0.00
		1.47	0.92	62.6	0.00
2	-14.33	1.48	0.92	62.3	0.00
		1.65	0.96	58.4	0.00
3	-14.28		1.91	14.1	0.00
		13.56	8.60	63.4	0.00
4	-13.14	13.57	8.64	59.5	0.00
		14.52	8.64	50.0	0.00
5	15.88				
	15.89	17.28			
6	17.03				
7	20.00				
S					

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus

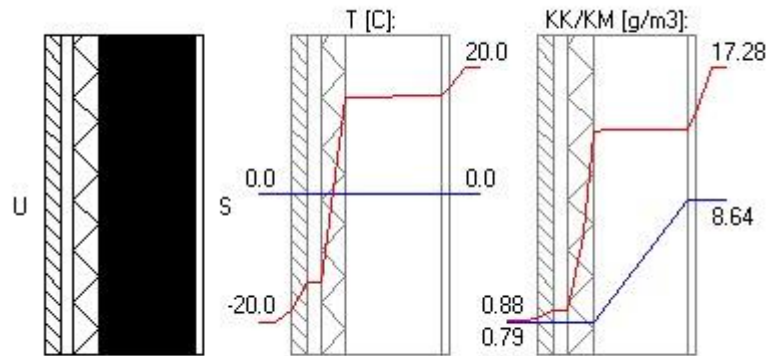
LIITE 2

Rakennuskohde:	Sisältö:	
Suunnittelija:	Päiväys: 17.2.2020	Tunnus:

Rakenteen päätiedot:

U-arvo: 0.623 W/m²K
Paksuus: 247.300 mm
Pinta-ala: 1.00 m²
Paino: 1203.67 kg
Hinta: 0.00 euro

Vesihöyryn vastus: 209158968.075
Vesih. läpäisykerroin: 0.000000 g/m²hPa
Lämmönvastus: 1.606 m²K/W
Pintavastus, ulko: 0.070 m²K/W
Pintavastus, sisä: 0.130 m²K/W
Kulma (0-90): 90.000

**Rakenteen kerrostiedot:**

Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)

	KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [gm/Nh]:	Hinta [e/m ³]:	Paino [kg/m ³]:
1	Puu (kuusi)	25.00	0.1400	1.000000e-05	0.00	440.00
2	Tuulettuva ilmarako	20.00	10.0000	1.000000e+01	0.00	0.00
3	Hetivalmis-Anselmi A	40.00	0.0342	6.373600e-08	0.00	200.00
4	Steel	150.00	50.0000	7.200000e-10	0.00	7800.00
5	Muovikalvo 0.30 mm	0.30	0.3400	1.540000e-09	0.00	900.00
6	Kipsilevy	12.00	0.2400	1.620000e-05		1200.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

Lämpötilat ja kosteudet:**3:n päivän kylmin (0.0 h)****Lisätiedot:**

Piste:	T [C]:	KK [g/m3]:	KM [g/m3]:	SK [%]:	C [g/m2]:
U	-20.00	0.88	0.79	90.0	0.00
1	-18.26	1.02	0.79	77.6	0.00
2	-13.81	1.55	0.79	50.9	0.00
3	-13.76	1.56	0.79	50.7	0.00
4	15.42	13.19	0.81	6.2	0.00
5	15.49	13.25	8.63	65.2	0.00
6	15.52	13.27	8.64	65.1	0.00
7	16.76	14.29	8.64	60.5	0.00
S	20.00	17.28	8.64	50.0	0.00

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus

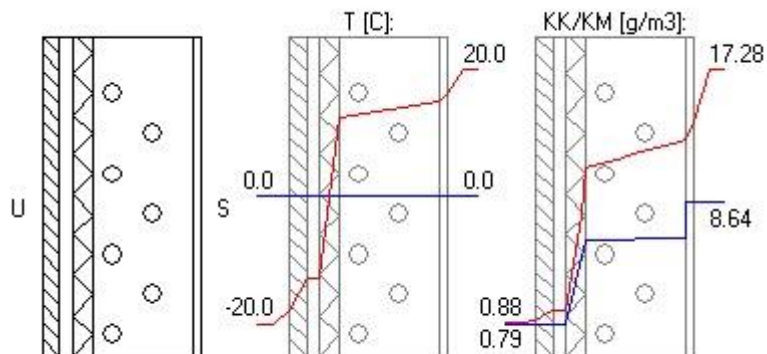
LIITE 3

Rakennuskohde:	Sisältö:	
Suunnittelija:	Päiväys: 17.2.2020	Tunnus:

Rakenteen päätiedot:

U-arvo: 0.715 W/m²K
Paksuus: 237.300 mm
Pinta-ala: 1.00 m²
Paino: 395.67 kg
Hinta: 0.00 euro

Vesihöyryn vastus: 675681.985
Vesih. läpäisykerroin: 0.000001 g/m²hPa
Lämmönvastus: 1.398 m²K/W
Pintavastus, ulko: 0.070 m²K/W
Pintavastus, sisä: 0.130 m²K/W
Kulma (0-90): 90.000

**Rakenteen kerrostiedot:**

Kerrokset ulkoa (U) sisälle (S)

	KERROS:	T [mm]:	LJ [W/mK]:	VHL [gm/Nh]:	Hinta [e/m ³]:	Paino [kg/m ³]:
1	Puu (koivu)	25.00	0.1400	1.000000e-05	0.00	600.00
2	Tuulettuva ilmarako	20.00	10.0000	1.000000e+01	0.00	0.00
3	Hetivalmis-Anselmi A	30.00	0.0342	6.373600e-08	0.00	200.00
4	Betoni	150.00	1.7000	2.160000e-05	0.00	2400.00
5	Muovikalvo 0.30 mm	0.30	0.3400	1.540000e-09	0.00	900.00
6	Kipsilevy	12.00	0.2400	1.620000e-05		1200.00

T = Paksuus, LJ = Lämmönjohtavuus, VHL = Vesihöyryn läpäisevyys

Lämpötilat ja kosteudet:**3:n päivän kylmin (0.0 h)****Lisätiedot:**

Piste:	T [C]:	KK [g/m3]:	KM [g/m3]:	SK [%]:	C [g/m2]:
U	-20.00	0.88	0.79	90.0	0.00
1	-18.00	1.04	0.79	75.9	0.00
		1.69	0.82	48.4	0.00
2	-12.89	1.70	0.82	48.2	0.00
			6.29	57.6	0.00
3	-12.83	10.91	6.37	50.1	0.00
		12.72	8.63	67.7	0.00
4	12.30	12.74	8.64	62.2	0.00
		14.82	8.64	50.0	0.00
5	14.85	13.89			
		17.28			
6	16.28				
	20.00				
7					
S					

T=Lämpötila, KK=Kyllästymiskosteus, KM=Kosteusmäärä, SK=Suhteellinen kosteus

LIITE 4

Vaasan ammattikorkeakoulu

Wolffintie 30
65200 Vaasa

Kustannuslaskelma_Betonirunko

Raporttityyppi:	Tiivis	Tulostuspäivä:	20.03.2020
Hanke:	Julkisivu aukko	Muokauspäivä:	20.03.2020
Laskelmat:	Uusi laskelma	Laskelman laajuus:	104 m ²
Rakennuslupa:		Hankepalveluprosentti:	0,00
Osoite:		Sotukerroin:	1,73
Osoite 2:		Aluekerroin:	1,00
Postinumero:		Vaikeuskerroin:	1,00
Postitmp:		ALV-%:	24,00
Maa:		Kaikki kust./laajuus ALV 0 %:	24 €/m ²
		Kaikki kust./laajuus sis. ALV:	30 €/m ²
		Laskelmien kaikki kust. yht. ALV 0 %:	2 524,59 €
		Laskelmien kaikki kust. yht. sis. ALV:	3 130,49 €

Laskelma Uusi laskelma

TALO2000 Kustannuserä

		Hankinnat					
		ja palvelut	Materiaalit	Työ	Tunnit	Yhteensä	
		(ALV 0 %)	(ALV 0 %)	(ALV 0 %)	(tth)	(ALV 0 %)	
Määrä	Yksikkö						
Yhteensä		0 €	1 414 €	1 111 €	31	2 525 €	

Rakenne:

1234	Teräsbetonipalkki 200 x 800 mm	17,40	jm	0,00 €	745,25 €	640,89 €	19,01	1 386,14 €
------	--------------------------------	-------	----	--------	----------	----------	-------	------------

Kuvaus:

Kustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- palkin koko
- tilausmäärä

Kustannuserään ei sisälly:

- kiinnitysosat
- asennus- ja kuljetuskustannukset

Paketti:

Palkki 200 x 800 mm, teräsbetonipalkki				0,00 €	42,83 €	36,83 €	1,09	79,66 €
--	--	--	--	--------	---------	---------	------	---------

Panokset:

rakennusmies, aputyö	0,11	tth			27,61 €	0,11		3,02 €
muottikirvesmies	0,98	tth			34,39 €	0,98		33,82 €

sahattu lauta 22 x 100 mm, kuusi C	19,19	jm	0,73 €	14,01 €
soiro 50 x 100 mm, mänty C	3,80	jm	1,49 €	5,66 €
betoni C25/30, S2, # 16 mm, norm. kovettuva	0,17	m3	106,92 €	18,69 €
teräs 10 mm, A500HW	4,56	kg	0,98 €	4,47 €

Rakenne:

1233	Teräsbetonipilari 300 x 300 mm, pulttiliitos	24,00	jm	0,00 €	668,40 €	470,05 €	11,96	1 138,45 €
------	--	-------	----	--------	----------	----------	-------	------------

Kuvaus:

Teräskset ja betoni rakennesuunnitelmien mukaan.

Hankinnoissa on otettu huomioon muottien vuokrauskustannus.

Vuokrauskustannuksiin vaikuttaa suuresti muottien vuokrausai-
ka.

Kustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- valittu muottijärjestelmä
- pilarien korkeus
- pilarien määrä (muottien vuokrauskustannukset)

Kustannuserään ei sisälly:

- nostokalusto
 - muottikalusto
-

Paketti:

Pilari 300 x 300 mm, teräsbetoni, pulttiliitos			0,00 €	27,85 €	19,59 €	0,50	47,44 €
--	--	--	--------	---------	---------	------	---------

Panokset:

rakennusmies, aputyö	0,05	tth			27,61 €	0,05	1,37 €
elementtiasentaja, betoni	0,45	tth			40,60 €	0,45	18,21 €
pilari, teräsbetonipilari 300 x 300 mm	1,00	jm		27,85 €			27,85 €

LIITE 5

Vaasan ammattikorkeakoulu

Wolffintie 30

65200 Vaasa

Kustannuslaskelma_Puurunko

Raporttityyppi	Ti-	Tulostuspäivä:	20.03.2020
Hanke:		Muokauspäivä:	20.03.2020
Laskelmat:		Laskelman laajuus:	104m ²
Rakennuslupa:		Hankepalveluprosentti:	0,00
Osoite:		Sotukerroin:	1,73
Osoite 2:		Aluekerroin:	1,00
Postinumero:		Vaikeuskerroin:	1,00
Postitmp:		ALV-	2400
Maa:		Kaikki kust./laajuus ALV 0 %:	16€/m ²
		Kaikki kust./laajuus sis. ALV:	19€/m ²
		Laskelmien kaikki kust. yht. ALV 0 %:	1 632,36
		Laskelmien kaikki kust. yht. sis. ALV:	2 024,13

Laskelma Uusi laskelma		Hankin- nat ja palvelut (ALV 0 %)	Materiaalit (ALV 0 %)	Työ Tunnit (ALV 0 %) (tth)	Yhteensä (ALV 0 %)
TALO2000 Kustannuserä	MääräYksikkö				
Yhteensä		0 €	1 301 €	331 €	10 1 632 €

Rakenne:

1234Liimapuupalkki 165 x 450 mm	17,40	jm	0,00 €	870,65 €	116,06 €	3,44	986,71 €
---------------------------------	-------	----	--------	----------	----------	------	----------

Kuvaus:

Kustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- palkin koko
- tilausmäärä

Kustannuserään ei sisälly:

- kiinnitysosat
- asennus- ja kuljetuskustannukset

Paketti:

Palkki 165 x 450 mm, liimapuu			0,00 €	50,04 €	6,67 €	0,20	56,71 €
-------------------------------	--	--	--------	---------	-----------	------	---------

Panokset:

liimapuupalkki L40, 165 x 450 mm, puhtaaksi höylätty	1,00	jm	50,04 €		50,04 €
mittakirvesmies	0,18	tth		34,39 €	0,18 6,13 €
rakennusmies	0,02	tth		27,61 €	0,02 0,54 €

sivu 1 / 2

Rakenne:

1233	Liimapuupilari 140 x 140 x 3000 mm,8,00 sis. pilarikengän	kpl	0,00 €	430,24 €	215,41 €	6,39	645,65 €
------	---	-----	--------	----------	----------	------	-------------

Kuvaus:

Kustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- pilarin koko
- tilausmäärä

Kustannuserään ei sisälly:

- kuljetuskustannukset
- nostokalusto

Paketti:

Pilari 140 x 140 x 3000 mm, liimapuu (sis. pilarikengän)	0,00 €	53,78 €	26,93 €	0,80	80,71 €
--	--------	---------	---------	------	---------

Panokset:

liimapuupilari L40, 140 x 140 x 3000 mm, €/kpl	1,00	kpl	45,24 €		45,24 €
pilarikengä (puupilarille)	1,00	kpl	8,54 €		8,54 €
mittakirvesmies	0,72	tth		34,39 €	0,72 24,72 €
rakennusmies, aputyö	0,08	tth		27,61 €	0,08 2,21 €

LIITE 6

Vaasan ammattikorkeakoulu

Wolffintie 30
65200 Vaasa

Kustannuslaskelma_Teräsrunko

Raporttityyppi:	Tiivis	Tulostuspäivä:	20.03.2020
Hanke:	Julkisivu aukko	Muokauspäivä:	20.03.2020
Laskelmat:	Uusi laskelma	Laskelman laajuus:	104 m ²
Rakennuslupa:		Hankepalveluprosentti:	0,00
Osoite:		Sotukerroin:	1,73
Osoite 2:		Aluekerroin:	1,00
Postinumero:		Vaikeuskerroin:	1,00
Postitmp:		ALV-%:	24,00
Maa:		Kaikki kust./laajuus ALV 0 %:	27 €/m ²
		Kaikki kust./laajuus sis. ALV:	34 €/m ²
		Laskelmien kaikki kust. yht. ALV 0 %:	2 857,56 €
		Laskelmien kaikki kust. yht. sis. ALV:	3 543,38 €

Laskelma Uusi laskelma

TALO2000 Kustannuserä

		Hankinnat				
		ja palvelut	Materiaalit	Työ	Tunnit	Yhteensä
		(ALV 0 %)	(ALV 0 %)	(ALV 0 %)	(tth)	(ALV 0 %)
Määrä	Yksikkö					
Yhteensä		0 €	2 506 €	351 €	9	2 858 €

Rakenne:

1234	Teräspalkki 400 mm, IPE	17,40	jm	0,00 €	1 779,32 €	127,15 €	3,13	1 906,48 €
------	-------------------------	-------	----	--------	------------	----------	------	------------

Kuvaus:**Paketti:**

Palkki 400 mm, teräs, IPE				0,00 €	102,26 €	7,31 €	0,18	109,57 €
---------------------------	--	--	--	--------	----------	--------	------	----------

Panokset:

teräspalkki, IPE 400 mm	1,00	jm		102,26 €				102,26 €
elementtiasentaja, metalli	0,18	tth			40,60 €	0,18		7,31 €
rakennusmies, aputyö	0,00	tth			27,61 €	0,00		0,00 €

Rakenne:

1233	Teräspilari, putkipalkki 100 x 100 mm	24,00	jm	0,00 €	726,96 €	224,13 €	5,52	951,09 €
------	---------------------------------------	-------	----	--------	----------	----------	------	----------

Kuvaus:

Kustannuksiin vaikuttavat tekijät:

- pilarin koko
- tilausmäärä

Kustannuserään ei sisälly:

- kiinnitysosat
- kaluston kustannukset
- kuljetuskustannukset

Paketti:

Pilari 100 x 100 x 6 mm, teräs, putkipalkki				0,00 €	30,29 €	9,34 €	0,23	39,63 €
---	--	--	--	--------	---------	--------	------	---------

Panokset:

teräspalkki, putkipalkki 100 x 100 x 6 mm	1,00	jm			30,29 €			30,29 €
elementtiasentaja, metalli	0,23	tth				40,60 €	0,23	9,34 €

rakennusmies, aputyö

0,00

tth

27,46 €

0,00

0,00 €

LIITE 7

Vaasan ammattikorkeakoulu

Wolffintie 30
65200 Vaasa

Kustannuslaskelma_Teäs+Betoni

Raporttityyppi:	Tiivis	Tulostuspäivä:	20.03.2020
Hanke:	Julkisivu aukko	Muokauspäivä:	20.03.2020
Laskelmat:	Uusi laskelma	Laskelman laajuus:	104 m ²
Rakennuslupa:		Hankepalveluprosentti:	0,00
Osoite:		Sotukerroin:	1,73
Osoite 2:		Aluekerroin:	1,00
Postinumero:		Vaikeuskerroin:	1,00
Postitmp:		ALV-%:	24,00
Maa:		Kaikki kust./laajuus ALV 0 %:	29 €/m ²
		Kaikki kust./laajuus sis. ALV:	36 €/m ²
		Laskelmien kaikki kust. yht. ALV 0 %:	3 044,92 €
		Laskelmien kaikki kust. yht. sis. ALV:	3 775,71 €

Laskelma Uusi laskelma

TALO2000 Kustannuserä

			Hankinnat			Yhteensä (ALV 0 %)	
	Määrä	Yksikkö	ja palvelut (ALV 0 %)	Materiaalit (ALV 0 %)	Työ Tunnit (ALV 0 %) (tth)		
Yhteensä			0 €	2 448 €	597 €	15	3 045 €

Rakenne:

1234	Teräspalkki 400 mm, IPE	17,40	jm	0,00 €	1 779,32 €	127,15 €	3,13	1 906,48 €
------	-------------------------	-------	----	--------	------------	----------	------	------------

Paketti:

Palkki 400 mm, teräs, IPE				0,00 €	102,26 €	7,31 €	0,18	109,57 €
---------------------------	--	--	--	--------	----------	--------	------	----------

Panokset:

teräspalkki, IPE 400 mm	1,00	jm			102,26 €			102,26 €
-------------------------	------	----	--	--	----------	--	--	----------

elementtiasentaja, metalli	0,18	tth				40,60 €	0,18	7,31 €
----------------------------	------	-----	--	--	--	---------	------	--------

rakennusmies, aputyö	0,00	tth				27,61 €	0,00	0,00 €
----------------------	------	-----	--	--	--	---------	------	--------

Rakenne:

1233	Teräsbetonipilari 300 x 300 mm, pulttiliitos	24,00	jm	0,00 €	668,40 €	470,05 €	11,96	1 138,45 €
------	--	-------	----	--------	----------	----------	-------	------------

Paketti:

Pilari 300 x 300 mm, teräsbetoni, pulttiliitos	0,00 €	27,85 €	19,59 €	0,50	47,44 €
--	--------	---------	---------	------	---------

Panokset:

pilari, teräsbetonipilari 300 x 300 mm	1,00	jm	27,85 €		27,85 €
--	------	----	---------	--	---------

elementtiasentaja, betoni	0,45	tth	40,60 €	0,45	18,21 €
---------------------------	------	-----	---------	------	---------

rakennusmies, aputyö	0,05	tth	27,61 €	0,05	1,37 €
----------------------	------	-----	---------	------	--------
